

А. Н. ИЗНАР, Б. Ф. ФЕДОРОВ

ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ  
ПРИБОРЫ (ЛАЗЕРЫ)  
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ВОЕННОЙ  
ТЕХНИКЕ

(По материалам зарубежной печати)



В доступной форме изложены основные физические принципы работы оптических квантовых приборов (лазеров), рассмотрены особенности устройства отдельных элементов и конструкций приборов на твердом активном веществе, газах, жидкостях и полупроводниках и приводятся характеристики этих приборов.

Значительное внимание уделено рассмотрению основных направлений военного применения оптических квантовых приборов для локации, связи, наведения и обнаружения на земле и в космосе.

Книга написана по данным иностранной печати на сентябрь 1963 г. и предназначена для инженеров, учащихся вузов и техникумов, а также других лиц, интересующихся квантовой электроникой и основными путями развития и военного применения оптических квантовых приборов за рубежом.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной науки и техники характерно не только углублением и расширением фронта исследований в пределах каждой научной дисциплины, но и тесным переплетением ряда смежных наук. При этом на стыках научных направлений часто рождается совершенно новая наука, открывающая неизвестные до сих пор возможности в исследовании и использовании законов природы.

Так, на протяжении последнего десятилетия благодаря использованию теории и методов квантовой механики, являющейся одним из основных разделов современной физики, при исследовании проблем генерации, распространения и регистрации излучений СВЧ диапазона радиоволн возникла и стала быстро развиваться новая научная дисциплина — *квантовая радиоэлектроника*.

Наиболее характерной особенностью квантовой радиоэлектроники является применение новых методов генерации и усиления излучений СВЧ диапазона за счет использования внутренней энергии частиц вещества. При этом в отличие от обычных приборов СВЧ диапазона, таких, как магнетроны, кlyстроны и ЛБВ, в которых используется взаимодействие электронных потоков с электрическими или магнитными полями, в *квантовых генераторах и усилителях* источниками излучений служат так называемые *квантовые системы*, т. е. молекулы, атомы и электроны, обладающие определенными энергетическими уровнями. При воздействии на такие квантовые системы излучением (или высокочастотным полем), частота и энергия квантов которого будет соответствовать частотам и энергиям квантовых

переходов с энергетических уровней облучаемой системы, будут возникать процессы поглощения или излучения энергии.

Первые работы в области квантовых генераторов и усилителей излучений принадлежат советским ученым, лауреатам Ленинской премии членам-корреспондентам АН СССР Н. Г. Басову и А. М. Прохорову [1, 2], предложившим новый метод генерации излучений СВЧ диапазона и создавшим квантовый генератор на основе излучения молекул аммиака. Им же принадлежит и ряд капитальных исследований в области квантовых приборов, результаты которых были опубликованы в 1954—1958 гг. и широко известны за рубежом [10]. Оригинальные работы по различным вопросам теории и по экспериментальным исследованиям квантовых приборов принадлежат также советским ученым Б. М. Вулу, Ю. М. Попову, С. Г. Раутиану, И. И. Собельману и другим.

Первую работу по применению полупроводниковых сред в квантовых устройствах инфракрасного диапазона опубликовали в 1958 г. А. С. Тагер и А. Д. Гладун.

В США вопрос о возможности генерирования излучений оптического диапазона с помощью квантовых систем был рассмотрен в статье Шавлова и Таунса, опубликованной в 1958 г. Через два года, в 1960 г., Мейману удалось создать импульсный оптический квантовый генератор на рубине, а в 1961 г. было опубликовано сообщение о создании Джаваном газового генератора с непрерывным излучением [12].

Необычные свойства квантовых генераторов и усилителей СВЧ диапазона, способных создавать когерентные, монохроматические и остронаправленные излучения, сразу же привлекли к ним внимание широких кругов учёных и радиоинженеров различных специальностей. Поэтому наряду с разработкой новых видов квантовых приборов СВЧ диапазона и методов их применения в квантовой радиоэлектронике все сильнее начали проявляться тенденции к освоению еще более коротковолновых участков электромагнитного спектра, в частности инфракрасного и видимого диапазона. Это объясняется значительно большей перспективностью использования излучений этих диапазонов для получения еще более когерентных, остронаправленных и мощных пото-

ков лучистой энергии по сравнению с излучениями СВЧ диапазона.

Одновременно разработка теории и методов создания квантовых приборов оптического диапазона спектра проводилась и силами ученых-оптиков, обладающих огромным опытом теоретических и экспериментальных исследований в смежных областях физической оптики, в частности в спектроскопии и люминесценции\*.

Впервые возможность усиления интенсивности излучения квантовой системы, находящейся в возбужденном состоянии, была теоретически сформулирована в 1940 г. известным советским оптиком В. А. Фабрикантом [11].

Так, на стыке квантовой механики, физической оптики и радиоэлектроники появилось новое направление, называемое *квантовой оптико-электроникой*, охватывающее теорию и методы создания, а также способы применения квантовых приборов оптического диапазона.

Создание квантовых генераторов и усилителей оптических излучений является одним из наиболее значительных достижений современной науки. Необычные параметры этих новых источников излучений, дающие возможность передавать информационные и управляющие сигналы, создавать чрезвычайно сильную концентрацию лучистой энергии на облучаемом объекте, высокая стабильность частоты излучения, как и ряд других свойств, вызвали большой интерес в первую очередь в связи с перспективами использования квантовых приборов оптического диапазона в военной технике [5, 10].

В течение последних двух-трех лет количество информационных и научных статей, а также рекламных сообщений по квантовым приборам СВЧ и оптического диапазона в иностранной печати непрерывно увеличивается. Только за 1962 г. было опубликовано более 400 статей и сообщений по квантовым приборам. Поэтому наряду с необходимостью систематизировать полученные результаты, что и является содержанием настоящей бро-

\* В 1951 г. В. А. Фабрикантом с группой сотрудников была оформлена авторская заявка с кратким изложением теории оптических усилителей излучений. Там же был описан метод возбуждения при помощи облучения среды высокочастотным источником излучений [13].

шюры, возникла потребность дать основные определения и объяснить некоторые используемые в дальнейшем термины. Поскольку это направление развивается очень быстро и привлекает внимание специалистов различных областей науки, в первую очередь радиотехники, радиолокации и оптики, литература по квантовым приборам начала заполняться большим количеством смешанных терминов, не всегда точно отражающих сущность определяемого явления или устройства.

В соответствии с принципом деления квантовых приборов в зависимости от используемого участка электромагнитного спектра широкое применение в иностранной литературе получили термины «мазер» и «лазер». Они возникли как сокращения, составленные из первых букв следующих определений процессов, происходящих в квантовых приборах СВЧ и оптического диапазонов спектра [5, 9]:

— microwave amplification by stimulated emission of radiation (мазер), т. е. усиление микроволн (колебаний СВЧ диапазона) с помощью стимулированного излучения энергии;

— light amplification by stimulated emission of radiation (лазер), т. е. усиление света с помощью стимулированного излучения энергии.

В некоторых случаях для выделения вопросов, связанных с созданием или применением квантовых приборов в инфракрасной области спектра, используется термин «иразер» (сокращение от infrared amplification by stimulated emission of radiation). Иногда в журнальных статьях и рекламных сообщениях применяют термин «оптический мазер». Несмотря на очевидную неточность такого понятия, его использование объясняется исторически, так как лазеры появились в результате применения «принципа мазера» в оптическом диапазоне спектра. Последнее время в ряде иностранных статей появился новый термин «ксазер» (xaser), которым характеризуют лазеры с мощностью излучения в десятки и сотни мегаватт.

В отечественной и переводной литературе наряду с широким использованием названий «мазер» и «лазер» часто применяют термин «оптический квантовый прибор» (ОКП), являющийся синонимом термина «лазер». Это определение и используется в данной брошюре.

Вторым признаком, по которому обычно проводят деление квантовых приборов на две основные группы, являются причины, вызывающие стимулированное излучение. Перву группу составляют квантовые генераторы, схема и принцип действия которых обеспечивают возникновение когерентного направлениого излучения только в результате воздействия искусственно приложенной энергии возбуждения («накачки» — pumping). Ко второй группе относятся квантовые усилители, в которых энергия возбуждения используется только для предварительного перераспределения населенности энергетических уровней квантовой системы так, чтобы при воздействии на нее слабого, но обладающего требуемой частотой, фазой и направленностью внешнего сигнала в усилителе возникало стимулированное излучение.

Квантовые приборы, работающие в оптическом диапазоне, носят название оптических квантовых генераторов или оптических квантовых усилителей. Аналогично определяют генераторы и усилители СВЧ диапазона.

Существует и ряд других признаков, характеризующих принципиальные особенности схемных, а иногда и конструктивных решений в различных вариантах квантовых приборов. Одним из них является физическое состояние среды («активного вещества»), в котором находятся квантовые системы, создающие излучение. Для квантовых приборов оптического диапазона эта среда может находиться в твердом, жидком и газообразном состояниях. Соответственно оптический квантовый генератор или усилитель может быть назван «твердым» (solid-state laser), «жидкостным» (liquid laser) или «газовым» (gaseous laser).

Часто квантовый прибор определяют не только по состоянию, но и по материалу, используемому в качестве активного вещества — среды, содержащей квантовые системы. Например, если в качестве активного вещества в квантовом приборе применяется искусственный кристалл рубина, то прибор может быть назван «рубиновый лазер» (ruby laser).

Наряду с разработкой лазеров, излучение в которых вызывается воздействием светового возбуждения, в течение последних двух-трех лет за рубежом проводятся интенсивные исследования новой группы оптических квантовых приборов, получивших в литературе название

диодных или инжекционных лазеров (injection laser). В этих квантовых приборах оптического диапазона излучение возникает за счет рекомбинации электронов и дырок в полупроводниковом переходе при возбуждении диода электрическим током.

С первых дней своего появления оптические квантовые генераторы и усилители привлекают все большее внимание военных кругов США. Необычные свойства их излучения, малогабаритность и экономичность, чрезвычайно быстрое улучшение основных характеристик\* — все это привело к резкому возрастанию количества научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по лазерам и проблемам их применения в военной технике, проводимым в США по заказам и контрактам Министерства обороны, Управления перспективных исследований МО (ARPA) и Управления по исследованию космического пространства (NASA). Опубликованные в 1962—1963 гг. данные [3, 4] показывают, что объем ассигнований на эти работы со стороны Министерства обороны и других правительственные учреждений США, а также частных фирм, быстро возрастают. Так, если в 1961 г. общие ассигнования на эти работы составляли не более 3 млн. долл., причем большинство контрактов было заключено на сумму не более 100 000 долл., то в 1963 финансовом году общий объем капиталовложений в работы по лазерам достигает суммы более 25 млн. долл., из которых около 20 млн. долл. ассигнуует правительство США, а остальные средства предоставляют частные фирмы. Отдельные контракты заключаются на суммы до 1,5 млн. долл. Только по линии Министерства обороны США на исследования по применению ОКП в военных целях в 1964 г. планируется израсходовать 15 млн. долл., а в 1965 г. — до 30 млн. долл. [13].

Среди основных военных учреждений США, ведущих перспективные исследования в различных областях военной техники, ассигнования на работы по лазерам распределяются следующим образом: BBC — 36,5% (около

\* Например, если два-три года назад импульсная мощность излучения рубинового лазера доходила у наиболее мощных опытных образцов до нескольких киловатт, то согласно последним сообщениям в США созданы рубиновые лазеры, развивающие в импульсе мощность до 90—100 Мвт (при длительности импульса порядка на-носекунд).

6,9 млн. долл.), Армия — 34% (около 6,5 млн. долл.), ВМФ — 10,5% (около 2,0 млн. долл.), ARPA и NASA — 19% (около 3,6 млн. долл.). При этом учитываются только ассигнования из госбюджета.

По содержанию работ расходы правительства США в 1963 г. распределяются примерно следующим образом:

- исследование общих физических принципов создания лазеров и изыскание новых материалов — 30%;
- разработка новых приборов — 40%;
- исследования по применению лазеров в военных целях — 30%.

Общее число фирм и научных учреждений, занятых в 1963 г. исследованиями и разработками в области лазеров по заказам Министерства обороны и других военных органов США, составляет около 60—70, а общее число военных заказов только Армии, Флота, BBC и NASA доходит до 125—130. Средняя сумма заказов на разработку непосредственно образцов военного назначения лежит в пределах 50—80 тыс. долл., однако большое число контрактов заключено на более крупные суммы, доходящие до 1,1—1,3 млн. долл.

К наиболее крупно финансируемым работам относятся: разработка образцов полевых дальномеров на лазерах (заказ Армии США на сумму 0,3 млн. долл.), разработка новых образцов лазеров (заказ BBC и МО США на 1,148 млн. долл.) и новых материалов (заказ BBC США примерно на 1 млн. долл.), крупные работы по созданию наземных и бортовых лазерных систем обзора пространства (на общую сумму около 4 млн. долл. по заданиям BBC и МО США), а также исследования и разработки лазерного оружия, на которые планируется израсходовать свыше 2,5 млн. долл.

Для контроля за расходованием ассигнований на исследовательские работы в этой области при Министерстве обороны США создан специальный Комитет по лазерам [4].

К работам в области лазеров привлечено несколько сот фирм, институтов и основные высшие учебные заведения США. Расширяется круг промышленных и научных организаций, ведущих работы по лазерам, в Англии, Франции и других крупных капиталистических странах.

Несмотря на большое количество статей и отдельных сообщений по лазерам, опубликованных в иностранной

периодической печати, до настоящего времени практически отсутствуют обзорные работы и монографии в русском переводе. С целью обобщения материалов, связанных с основными направлениями применения лазеров в военной технике, и написана настоящая брошюра.

Разумеется, брошюра не лишена недостатков, поэтому авторы с благодарностью утрут замечания и пожелания читателей, которые следует направлять по адресу: Москва, Главный почтамт, п/я 693.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Басов Н. Г. и Прохоров А. М. ЖЭТФ, 1954, т. 27, стр. 431.
2. Басов Н. Г. и Прохоров А. М. ДАН, 1955, т. 101, стр. 47.
3. Aviation Week, 1962, Jan., v. 76, № 3, p. 92, 95, 99, 101, 103, 107.
4. Aviation Week, 1963, Apr. 22, p. 54, 55, 63, 64.
5. Шавлов А., Фогель С., Дальберджер Л. Оптические квантовые генераторы. Пер. с англ. Изд-во иностранной литературы. 1962.
6. IBM, J. Res., 1961, v. 5, p. 56.
7. Phys. Rev. Letters, 1961, v. 6, p. 106.
8. L'onde électrique, 1963, v. XLIII, № 436—437, p. 738—747.
9. Зингер Дж. Р. Мазеры. Пер. с англ. под ред. Ф. В. Бункина. Изд-во иностранной литературы. 1961.
10. Proc. IEEE, 1963, v. 51, № 1.
11. Бутаева Ф. А. и Фабрикант В. А. В сб. «Исследования по экспериментальной и теоретической физике» (памяти Г. С. Ландсберга). Изд-во АН СССР, 1959.
12. Лазеры. Сб. статей. Под ред. М. Е. Жаботинского и Т. А. Шмаонова. Изд-во иностранной литературы, 1963.
13. Missiles and Rockets, 1963, v. 13, № 11, p. 9.

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

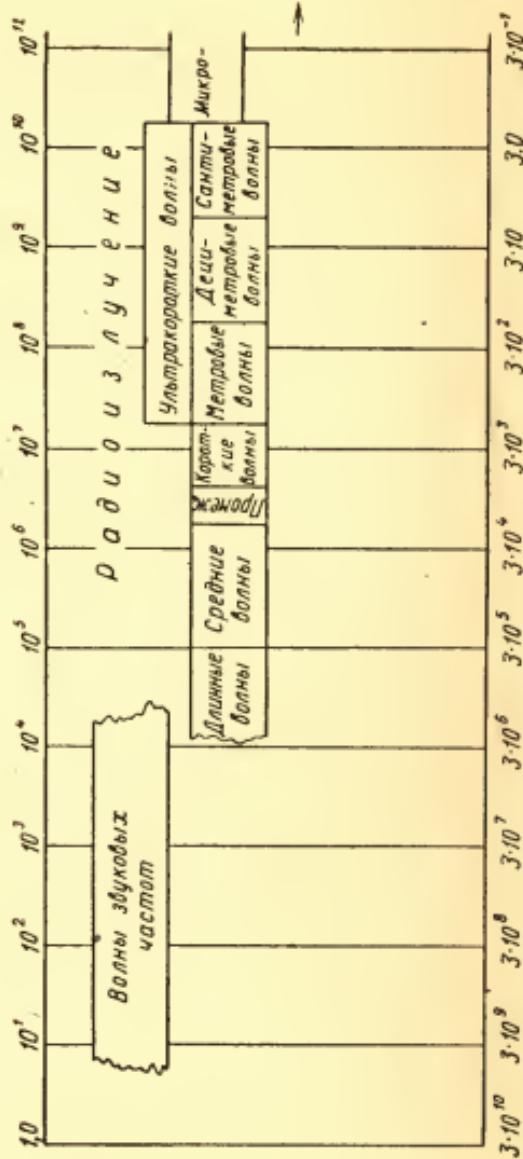
### ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ

#### 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ИЗЛУЧЕНИЯ

В природе происходит постоянный обмен энергией между телами. Эта энергия переносится в пространстве от одного тела к другому либо с помощью материальных частиц, либо с помощью переменного электромагнитного поля. Процесс испускания частиц и электромагнитных волн называют излучением.

Если энергия переносится посредством электромагнитных волн, излучение характеризуется длиной волны  $\lambda$ , частотой  $v$  и скоростью распространения  $v$ . В некоторых случаях для характеристики колебаний используют понятие «волновое число». Под волновым числом понимают число длин волн, укладывающихся в отрезке, равном одному сантиметру. Диапазон волн электромагнитных колебаний простирается от  $1 \cdot 10^{-11}$  до  $3 \cdot 10^{10}$  см и включает в себя следующие виды излучений:  $\gamma$ -излучение, рентгеновское, оптическое и радиоизлучение. Оптическое излучение охватывает диапазон волн примерно от  $3 \cdot 10^{-1}$  до  $3 \cdot 10^{-6}$  см ( $10^{12}$ — $10^{17}$  эц). В свою очередь оптический диапазон волн разбивают на ультрафиолетовую, видимую и инфракрасную области. Границные значения этих областей видны на шкале, изображающей спектр электромагнитных колебаний (рис. 1.1).

В оптическом диапазоне спектра для измерения длин волн употребляют следующие единицы: микрон ( $1 \text{ мк} = 10^{-4}$  см) и ангстрем ( $1 \text{ \AA} = 10^{-8}$  см).



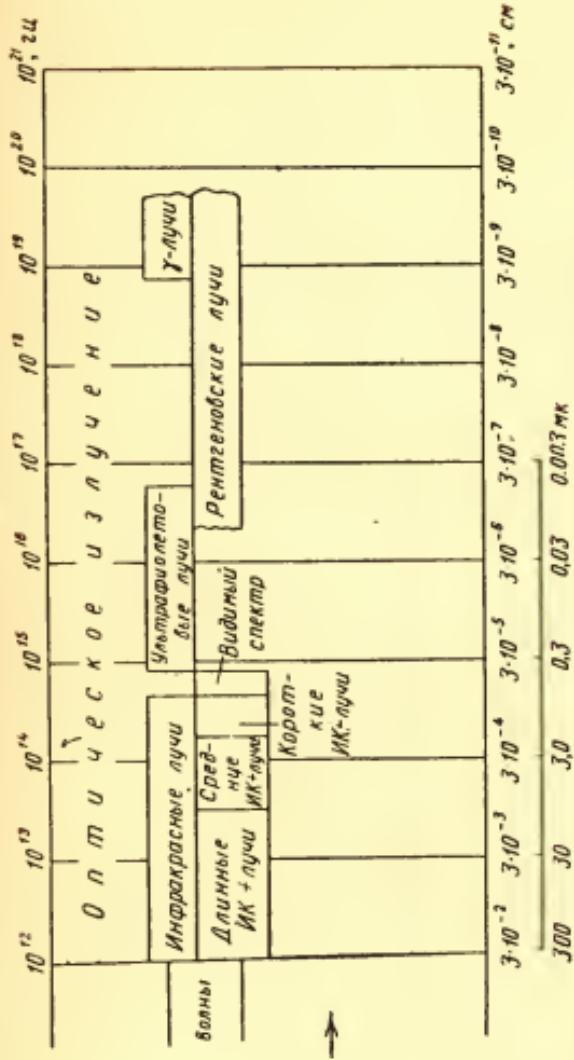


Рис. 1.1. Спектр электромагнитных колебаний.

В таблице сопоставлены волновые и квантовые характеристики некоторых длин волн оптического диапазона

Вид излучения	Длина волны, см	Частота колебаний, гц	Энергия кванта, эв
Инфракрасные лучи . . . . .	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{13}$	0,124
Красные лучи . . . . .	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{14}$	1,65
Зеленые лучи . . . . .	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{14}$	2,48
Ультрафиолетовые лучи . . . .	$3 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{15}$	13,6

Излучение принято характеризовать следующими параметрами: лучистой энергией, лучистым потоком, силой излучения, плотностью излучения, спектральным составом и степенью когерентности. Источники излучения принято характеризовать температурой и коэффициентом полезного действия.

Лучистая энергия является количественной мерой излучения и в практической системе единиц измеряется в джоулях. Однако, если рассматривается вопрос о преобразовании лучистого потока в тепловое движение молекул и наоборот, то в этом случае лучистую энергию измеряют в единицах количества тепла, в калориях ( $1 \text{ дж} = 0,239 \text{ кал}$ ).

В процессах возникновения и поглощения излучения единицей энергии принято считать электронвольт (эв), численно равный энергии, приобретаемой движущимся электроном, проходящим участок поля с разностью потенциалов в 1 в ( $1 \text{ эв} = 1,59 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 1,59 \cdot 10^{-19} \text{ дж}$ ).

Лучистый поток характеризует мощность оптического излучения, т. е. лучистую энергию, переносимую потоком фотонов в единицу времени.

При определении мгновенного значения лучистого потока следует учитывать, что это значение является средней статистической характеристикой тех микропроцессов, которые в совокупности составляют излучение.

Единицей измерения лучистого потока является ватт, который связан с другими единицами следующей зависимостью:  $1 \text{ вт} = 0,239 \text{ кал/сек} = 6,29 \cdot 10^{20} \text{ эв/сек}$ .

Для полной количественной и качественной характеристики лучистого потока необходимо знать его распределение во времени, в пространстве и по спектру.

Если в практической светотехнике до сих пор при анализе распределения лучистого потока пренебрегали квантовой дискретностью излучения, то при анализе процессов поглощения и преобразования энергии в оптических квантовых генераторах и усилителях на квантовую дискретность излучения обращают особое внимание.

*Сила излучения* характеризует пространственную плотность лучистого потока в данном направлении. Она численно равна отношению лучистого потока к величине телесного угла, в пределах которого распределен этот поток. Поскольку телесный угол измеряется в стерадианах, то сила излучения имеет размерность  $вт/страд$ .

*Плотность излучения* характеризует поверхностную плотность лучистого потока, испускаемого поверхностью данного источника. Это понятие необходимо для оценки равномерности излучения поверхностью излучателя. Размерность плотности излучения —  $вт/см^2$ .

В случае, если излучатель не равнояркий, то применяют понятие *лучистая яркость*, которая характеризует поверхностную плотность силы излучения в заданном направлении и выражается в  $вт/см^2 \cdot страд$ .

*Спектральный состав излучения* характеризует распределение излучения по длинам волн. Излучения могут быть однородными и сложными. Однородным излучением называется излучение в узком конечном участке спектра. Однородное излучение эквивалентно монохроматическому в пределах точности измерений. (Монохроматическим является такое излучение, у которого постоянны в пространстве и во времени амплитуда колебания, скорость распространения волны и время полного периода.) Сложные излучения представляют собой совокупность большего или меньшего числа однородных излучений и могут иметь линейчатый, полосатый или сплошной спектр.

Линейчатый спектр состоит из отдельных тонких линий, отчетливо разделенных друг от друга. Такие спектры характерны для одноатомных газов.

Полосатый спектр состоит из большого числа близко расположенных линий, образующих отдельные четко разграниченные полосы. Такие спектры излучаются многоатомными молекулами газообразных и жидких тел.

Сплошной спектр состоит из бесконечного числа линий, непрерывно следующих одна за другой. Такой

спектр излучения излучателя характерен для теплового излучения твердых и жидких тел, возникающего при непрерывном хаотическом движении молекул. Спектральное распределение энергии излучения для различных спектров показано на рис. 1.2.

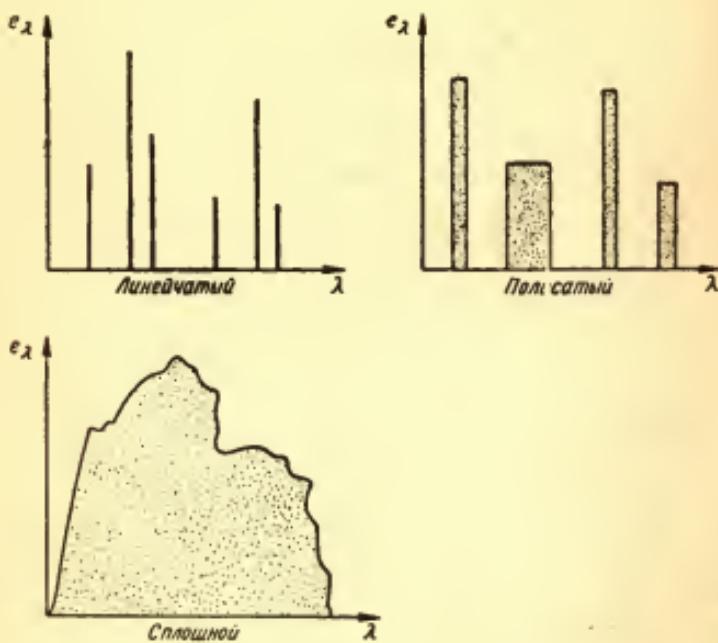


Рис. 1.2. Типы спектров излучения.

*Степень когерентности* характеризует взаимосвязь отдельных видов колебаний по частоте и фазе. Каждый элементарный излучатель, согласно волновой теории, излучает электромагнитную волну определенной частоты. Несколько элементарных излучателей могут излучать одновременно и с постоянной частотой. В этом случае говорят, что излучение когерентно во времени и по фазе, так как электромагнитная волна имеет постоянную разность фаз.

Излучение различных источников обычно сравнивают с излучением абсолютно черного тела (АЧТ), модель которого представляет собой замкнутую полость с малым отверстием, стенки которой равномерно нагреваются до

необходимой температуры. Излучение отверстия зависит только от температуры и может быть рассчитано теоретически [2].

Интегральная плотность излучения АЧТ пропорциональна четвертой степени его температуры, спектральное распределение излучения описывается законом Планка.

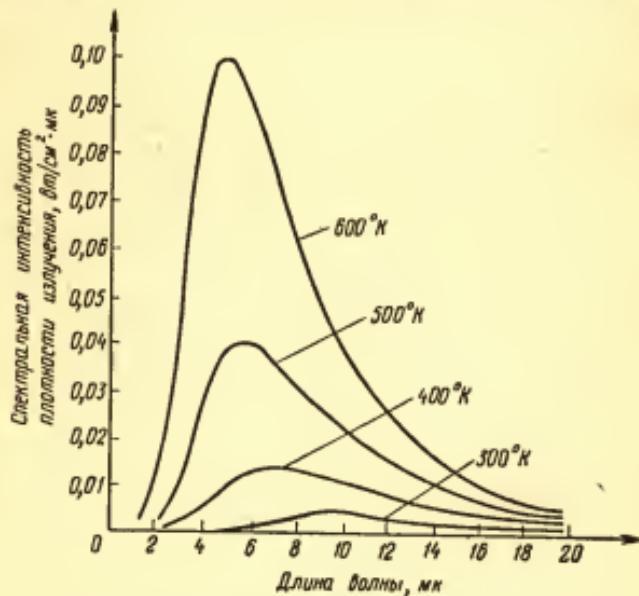


Рис. 1.3. Ход кривых спектральной плотности излучения абсолютно черного тела.

Ход кривых спектральной интенсивности плотности излучения АЧТ, нагретого до разных температур, показан на рис. 1.3.

Для сопоставления характеристик реальных излучателей и АЧТ пользуются понятием эквивалентных (ка-жущихся) температур. Таких температур установлено три: яркостная, энергетическая и цветовая. Поскольку в дальнейшем будем пользоваться только яркостной температурой, приведем ее определение.

*Яркостная температура* соответствует такой температуре АЧТ, при которой его яркость для излучения с длиной волны 0,665 мк равна яркости в той же зоне спектра исследуемого излучателя при заданной (истинной) температуре.

Условие эквивалентности яркости в узкой зоне спектра равноценно условию эквивалентности спектральной плотности лучистого потока.

*Коэффициент полезного действия* определяет эффективность того или иного источника излучения, в котором происходит преобразование какого-либо вида энергии в энергию излучения. Количественно к. п. д. определяется отношением лучистого потока, излучаемого источником, к подводимой к нему мощности.

Источником излучения может быть любая материальная система, в которой происходит преобразование подводимой к ней энергии в энергию излучения. В соответствии с этим можно рассматривать следующие основные группы источников: тепловые, люминесцентные и др. В последнее время появился новый вид источников излучения — квантовые генераторы.

В тепловых источниках энергия излучения является следствием преобразования тепловой энергии, которая выделяется либо при прохождении тока в среде, либо в результате преобразования механической энергии, либо при нагревании среды.

В люминесцентных источниках энергия излучения возникает в результате локализованного возбуждения частиц (центров люминесценции) излучающей среды. Энергия возбуждения сообщается люминесцирующим частицам различными способами (электрическим, оптическим, химическим и др.).

В квантовых генераторах энергия излучения является следствием возникновения резонансного возбуждения частиц излучающей среды. Энергия возбуждения передается частицам также различными способами (оптическим, электрическим, радиационным и др.).

## 2. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПОНЯТИЯ О КВАНТОВЫХ СИСТЕМАХ

Под квантовой системой условимся понимать микросистему, состоящую из элементарных частиц, т. е. молекул, атомов, электронов и ионов, взаимодействие между которыми рассматривается на основе законов квантовой механики.

Физические свойства этих систем, зависящие от формы и строения вещества, определяются энергетическим состоянием системы [3, 4]. Внутренняя энергия таких

микросистем может принимать лишь строго определенные квантованные значения. Для каждой системы существует вполне определенный набор допустимых значений энергии. Переход системы из одного энергетического состояния в другое может происходить только скачкообразно. Распределение энергетических уровней зависит как от внутреннего строения системы, так и от внешнего воздействия других систем.

Рассмотрим возможные энергетические состояния па примере отдельного свободного атома. На рис. 1.4

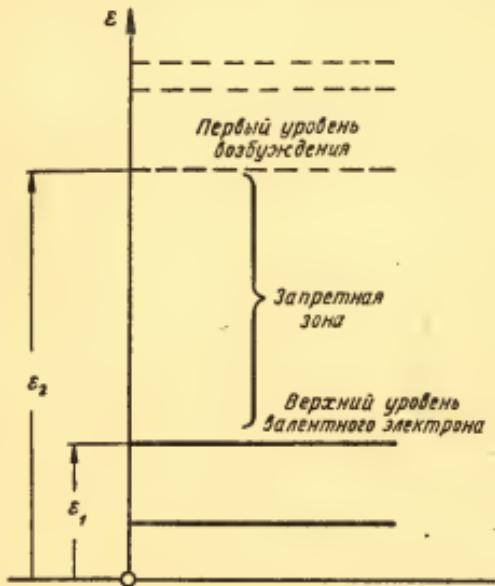


Рис. 1.4. Уровни энергий в отдельном (свободном) атоме.

изображена шкала уровней в отдельном (свободном) атоме. Каждая черта на этой шкале соответствует определенному уровню энергии. Атом состоит из ядра и системы электронных оболочек с вращающимися вокруг ядра электронами. Каждый электрон обладает вполне определенной энергией. Чем дальше электрон от ядра, тем большей энергией он обладает.

При нормальном состоянии атома электроны внутренней и наружной (валентной) оболочек имеют уровни энергии, изображенные сплошными линиями. Пунктирные

ными линиями обозначены дополнительные энергетические уровни, которые также могут заполняться электронами.

Согласно квантовой теории электроны атома имеют строго определенные энергетические состояния (уровни) и могут находиться в ряде прерывных (дискретных) устойчивых положений. Возможные энергетические уровни отделены друг от друга запретными энергетическими полосами. Для того чтобы электрон перешел с нижнего на более верхний уровень, ему необходимо сообщить дополнительную энергию либо за счет электромагнитного поля, либо за счет соударения с другим электроном. В случае, когда электрон находится на верхнем уровне, он называется «возбужденным», так как обладает дополнительной энергией. При обратном переходе с верхнего уровня на нижний он отдает эту энергию в виде излучения определенной частоты, которая определяется разностью уровней:

$$v = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{h},$$

где  $\epsilon_2$  и  $\epsilon_1$  — энергия электрона на верхнем и нижнем уровнях;

$h$  — постоянная Планка.

Процесс «перескакивания» электронов с одного энергетического уровня на другой называется квантовым переходом.

Проведенный анализ энергетического состояния свободного атома применим не только к отдельному свободному атому, но и к системам, состоящим из атомов, молекул и ионов. Однако в этом случае картина распределения энергетических уровней значительно меняется, поскольку электромагнитные поля отдельных частиц оказывают друг на друга влияние, приводящее к тому, что вместо отдельных уровней образуются энергетические полосы и зоны. Квантовый переход возбужденных частиц с таких полос приводит к тому, что эти частицы отдают энергию в виде излучения не строго определенной частоты, а целой полосы частот.

Полоса излучаемых частот тем шире, чем сильнее взаимодействие частиц. Вещества, состоящие из газовых компонентов, имеют узкую полосу излучения из-за сла-

бого взаимодействия частиц. Вещества, состоящие из твердых компонентов, дают более широкую полосу излучения.

Основным состоянием системы является состояние с наименьшей энергией. Однако вследствие хаотического теплового движения молекул часть энергии этого движения переходит в энергию внутренних движений и колебаний атомов, поэтому и на верхних энергетических уровнях может находиться определенное количество частиц. Обычно чем выше уровень, тем меньшее число частиц на нем находится.

Наблюдаемое при основном (равновесном) состоянии распределение частиц по уровням характеризуется формулой

$$N_i = A e^{-\frac{e_i}{kT}},$$

где  $N_i$  — число частиц на  $i$ -м уровне;

$A$  — нормированная постоянная;

$e_i$  — энергия  $i$ -го уровня;

$k$  — постоянная Больцмана;

$T$  — абсолютная температура.

Из этого соотношения следует, что при любом положительном значении  $T$  число частиц с возрастанием энергии уровней убывает, т. е. имеет место неравенство  $N_i > N_m$  при  $e_i < e_m$ .

При неравновесном состоянии системы на более высоком уровне расположено больше частиц, чем на более низком. Формально такое распределение частиц по энергетическим уровням получается, если считать  $T$  отрицательной. Поэтому состояние системы, у которой на верхнем уровне больше частиц, чем на нижнем, называется состоянием с *отрицательной температурой* [5].

Системы, находящиеся в состоянии с положительной и отрицательной температурами, по-разному взаимодействуют с проходящей через них электромагнитной волной, имеющей частоту  $v = \frac{e_m - e_i}{h}$ . Если волна проходит через систему, имеющую положительную температуру, то происходит поглощение энергии этой волны.

В этом случае интенсивность падающей волны превосходит интенсивность выходящей волны ( $J_0 > J$ ). Если же электромагнитная волна проходит через систему, находящуюся в состоянии с отрицательной температурой, то имеет место так называемое отрицательное поглощение, при этом происходит усиление энергии проходящей волны (рис. 1.5). Интенсивность выходящей волны в этом случае превосходит интенсивность падающей волны ( $J > J_0$ ).

Если система находится в состоянии с отрицательной температурой, существует определенная вероятность, что

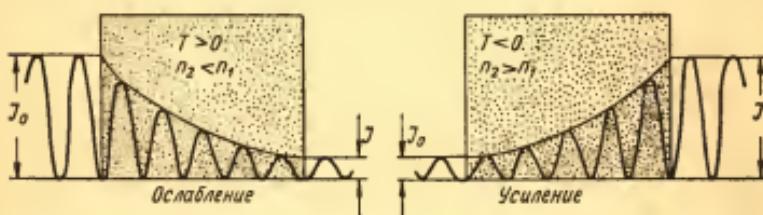


Рис. 1.5. Ослабление и усиление электромагнитной энергии системами с положительной и отрицательной температурами.

часть частиц перейдет на нижний энергетический уровень и произойдет излучение энергии.

Эта вероятность имеет две составляющие: постоянную и переменную. Постоянная составляющая вероятности перехода аналогична вероятности распада радиоактивного вещества; она зависит от свойств системы и данного перехода и не зависит от внешних факторов. Переменная составляющая зависит от плотности энергии внешнего электромагнитного поля на частоте перехода. Наличие поля на частоте перехода повышает вероятность излучения системы. Если поле, действующее на систему извне, отсутствует, то процесс перехода системы в состояние с положительной температурой, сопровождаемый излучением, характеризуется постоянной составляющей вероятности перехода. Излучение в этом случае носит *спонтанный* характер.

Другими словами, спонтанное излучение представляет собой самопроизвольное излучение возбужденных частиц, возникающее при хаотическом их переходе с верхнего на нижний энергетический уровень.

Так как при спонтанном излучении частицы отдают запасенную ими энергию самопроизвольно и случайно в различные моменты времени, то это излучение является некогерентным и широкополосным. Примером такого излучения является излучение обычной лампы накаливания.

Если на квантовую систему действует внешнее поле на частоте перехода, то процесс спонтанного перехода системы в состояние с положительной температурой происходит по-прежнему; при этом фазы испускаемого излучения не зависят от внешнего электромагнитного поля. Однако, как указывалось выше, внешнее поле на частоте перехода повышает вероятность этого перехода, вызывая излучение, находящееся в определенном фазовом соотношении с внешним полем. Излучение в этом случае носит *стимулированный* характер. Особенностью стимулированного излучения является его когерентность (так как все частицы излучают одновременно и в одной фазе) и монохроматичность (так как излучение занимает узкую полосу частот).

Система, находящаяся в состоянии с отрицательной температурой, может стать источником увеличения электромагнитной энергии. Это явление усложняется тем, что системы, находящиеся в равновесном состоянии, поглощают излучение на частоте перехода, причем вероятность этого поглощения равна вероятности стимулированного излучения. Следовательно, при использовании системы для увеличения энергии необходимо обеспечить перевод ее частиц на верхние энергетические уровни и каким-нибудь способом поддерживать избыток частиц в этом состоянии. Для достижения неравновесного состояния система совсем не обязательно должна поглотить энергию на частоте перехода. Требуемая энергия может быть обеспечена электронной бомбардировкой или же оптическим возбуждением. Возможны также и другие способы возбуждения, о которых будет сказано ниже.

Таким образом, чтобы усилить электромагнитное поле за счет внутренней энергии частиц вещества, необходимо иметь квантовую систему (активное вещество) и источник энергии, который переводил бы частицы в возбужденное состояние. Кроме того, необходимо перевести частицы на такие энергетические уровни, на

которых они могли бы находиться сравнительно долгое время, с тем чтобы произошло их накопление на этом уровне. Это может быть обеспечено, если время жизни частиц на данном энергетическом уровне больше времени релаксации, т. е. времени перехода частиц на нижний уровень.

При значительной перенаселенности верхнего энергетического уровня и большом коэффициенте усиления, вследствие чего компенсируются потери энергии в активном веществе, усилитель переходит в режим генерации энергии, которая может быть непрерывной, если поддерживается перенаселенность верхнего уровня. Таким образом, для получения стимулированного излучения необходимо создать перенаселенность верхнего энергетического уровня по сравнению с нижним, для чего необходимо иметь вещество, которое могло бы принимать состояние с отрицательной температурой, и источник энергии, который приводил бы частицы в возбужденное состояние.

### 3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И УСИЛИТЕЛЕЙ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ИЗЛУЧЕНИЯ

Принципиальная схема генератора и усилителя приведена на рис. 1.6. Генератор и усилитель состоят из сдвоих и тех же основных элементов: активного вещества, размещенного в объемном резонаторе, образованном двумя плоско-параллельными зеркалами, источника возбуждения и источника питания. Незначительные отличия основных элементов генератора и усилителя состоят в следующем: у усилителя обе зеркальные пластины объемного резонатора полупрозрачны, у генератора полупрозрачна обычно только одна из пластин. Кроме того, генератор имеет более мощный источник возбуждения.

Принцип действия оптического генератора рассмотрим на примере рубинового генератора, поскольку в первых образцах приборов, разработанных в 1960 г. [5], в качестве активного вещества использовался кристалл рубина. Этот рубин был получен синтетическим путем из окиси алюминия, в которой небольшое число атомов алюминия было замещено атомами хрома (0,05—0,5%). Количество хрома определяется цвет

рубина, который меняется от бледно-розового до темно-вишневого при увеличении содержания хрома.

В качестве источника возбуждения применялась импульсная лампа, которая охватывала стержень со стороны цилиндрической поверхности рубина. Источником питания служил конденсатор большой емкости, заряженный от выпрямителя.

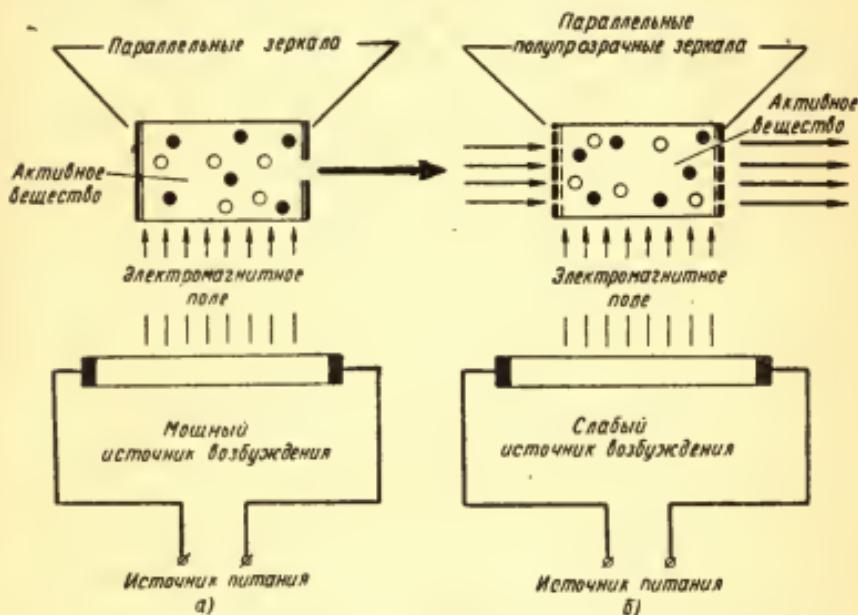


Рис. 1.6. Принципиальная схема оптических квантовых приборов:  
а — генератора, б — усилителя.

Оптический квантовый генератор работает следующим образом. Заряженный от выпрямителя конденсатор разряжается через лампу, излучение которой использовалось для перевода рубина в неравновесное состояние и для получения стимулированного излучения [8].

Механизм возбуждения активного вещества и возникновения стимулированного излучения понятен из рис. 1.7. При облучении кристалла рубина электромагнитной энергией, содержащей излучение с длиной волны  $\lambda=5600 \text{ \AA}$  (т. е. зеленую часть видимого спектра), ионы хрома поглощают это излучение и переходят на верхний энергетический уровень. Возвращение ионов в основное состояние осуществляется двумя последовательными

переходами. При первом переходе ионы отдают часть своей энергии кристаллической решетке. Это так называемый безызлучательный переход на промежуточный (метастабильный)  $R$ -уровень. Находясь на этом уровне, ионы пребывают в так называемом метастабильном состоянии более длительное время, чем когда они находятся на верхнем уровне. В результате создается избыточная населенность метастабильного уровня. При отсут-

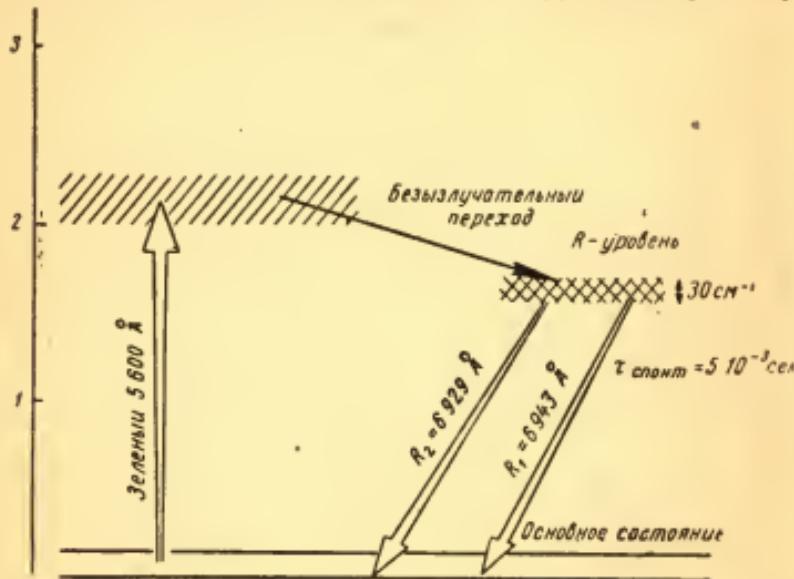


Рис. 1.7. Схема энергетических уровней ионов хрома в рубине.

ствии воздействия извне ионы остаются в таком состоянии несколько миллисекунд и совершают второй переход, возвращаясь в основное состояние, излучая при этом две узкие красные линии  $R_1=6943 \text{ \AA}$  и  $R_2=6929 \text{ \AA}$ . Возвращение ионов в основное состояние происходит лавинообразно. Достаточно одному из ионов совершить переход, как выделенный при этом квант энергии вызывает стимулированное излучение других ионов. Все ионы, находящиеся на метастабильном уровне, одновременно совершают переход на основной уровень, излучая энергию на частоте перехода. Это излучение когерентно и монохроматично.

Ширина линий  $R_1$  и  $R_2$  зависит от концентрации ионов хрома в кристалле и от его температуры.

Если рубиновый стержень используется в качестве усилителя, то в этом случае он недовозбуждается, а излучение, подлежащее усилению, направляется через полупрозрачное зеркало внутрь активного вещества. Это излучение, при наличии в нем волны с частотой перехода, вызывает стимулированный переход всех ионов, в результате чего и происходит усиление стимулирующей волны.

Чтобы получить значительное усиление электромагнитной волны, необходимо заставить участвовать в излучении возможно большее число возбужденных частиц. Этого можно достигнуть увеличением размеров активного вещества и использованием эффекта многократного отражения электромагнитной волны от двух отражающих пластин, расположенных по торцам активного вещества. При многократном отражении волны в процесс излучения вовлекается все большее число возбужденных частиц, в результате чего происходит нарастание интенсивности стимулированного излучения. Таким образом, для получения значительного усиления электромагнитной волны необходимо поместить активное вещество в объемный резонатор, образованный двумя параллельными отражающими поверхностями. В этом случае имеет место резонансное усиление электромагнитной волны [6, 7].

В результате многократного прохождения электромагнитной волны через активное вещество происходит значительное увеличение мощности излучения. Это излучение выводится наружу через полупрозрачное зеркало объемного резонатора.

Следует отметить, что в этом случае наряду со стимулированным излучением имеет место и спонтанное излучение, представляющее собой в основном статистический процесс, в результате которого генерируются лишь шумы и фазовой когерентности не наблюдается.

Однако применение объемного резонатора способствует усилению только определенного вида колебаний из большого числа колебаний, имеющих место в резонаторе. Поскольку диаметр отражающих пластин обычно меньше расстояния между ними, то хорошо выделяются и усиливаются только колебания того вида, на-

правление распространения которых близко совпадает с осью резонатора. Остальные колебания усиливаются значительно меньше или же вовсе уходят за пределы объемного резонатора через боковые стенки активного вещества.

Выходящая со стороны полупрозрачной пластины электромагнитная волна имеет почти плоский фронт и поэтому угол расходления волны чрезвычайно мал и определяется только дифракцией.

Таким образом, в физической основе работы оптических квантовых генераторов и усилителей заложены принципы получения узконаправленного, когерентного, монохроматичного, значительного по мощности излучения.

Выходное излучение является узконаправленным потому, что испускаются лишь волны, многократно отраженные и не испытавшие сколько-нибудь существенного отклонения от оси объемного резонатора. Ширина луча оптического квантового генератора ограничивается только явлением дифракции и равна

$$\theta = \frac{\lambda}{d} \text{ rad},$$

где  $\theta$  — угловой раствор луча;

$\lambda$  — длина волны;

$d$  — диаметр источника излучения.

Таким образом, чем короче длина волны, тем меньшей угловой расходимостью обладает излучение квантового генератора.

Излучение имеет большую мощность, так как в стимулированном излучении участвует большое количество возбужденных частиц. Мощность оптического квантового генератора возрастает с увеличением концентрации активных частиц, а также с увеличением размеров активного вещества.

Однако увеличение выходной мощности излучения таким путем имеет предел, наличие которого вызвано внутренними потерями, которые возрастают с ростом размеров активного вещества. Высокая степень монохроматичности излучения обусловлена тем, что стимулиро-

ванное излучение представляет собой резонансный процесс и в силу этого более строго привязано к центру полосы частот, чем излучение, спонтанно испускаемое частицей. Излучение этих «предпочтительных частот», в свою очередь, возбуждает излучение на той же частоте. Относительная ширина полосы некоторых генераторов составляет величину порядка  $10^{-11}$ — $10^{-12}$ , в то время как используемый до настоящего времени стандарт — «монохроматический» источник света в виде лампы с парами натрия — имеет ширину линии порядка  $10^{-5}$ .

Наконец, поскольку выходной сигнал по форме близок к плоской волне, то он является *пространственно-когерентным*, потому что все волновые фронты плоские и перпендикулярны направлению распространения волн. Поскольку же выходной сигнал почти монохроматичен, он является *когерентным и во времени*. Это означает, что имеется строгое фазовое соответствие между частью волны, испускаемой в один момент времени, и волной, излучаемой спустя некоторый определенный промежуток времени. Чем более точно волна сохраняет заданную частоту, тем более отчетливо проявляется свойство когерентности волны во времени.

В связи с тем, что излучение оптических квантовых генераторов может быть сфокусировано с помощью обычных оптических систем на площадки весьма малых размеров, это позволяет получить высокие концентрации поверхностной плотности лучистого потока.

Облученность в центре пятна дифракционной картины, полученной с помощью квантового генератора, равна

$$E = \frac{\Phi S}{\lambda^2 f^2},$$

где  $\Phi$  — лучистый поток квантового генератора;

$S$  — входная площадь оптической системы;

$f$  — фокусное расстояние оптической системы.

Эта облученность может достигать значения  $10^{12}$ — $10^{16}$   $vt/cm^2$ . Такие плотности энергии ранее никогда не были известны ученым. Они в сотни миллионов раз превышают плотность энергии, которая может быть получена при использовании солнечного излучения.

Спектральная плотность лучистого потока оптических генераторов также достигает значительной величины, составляющей  $10^{17}$ — $10^{18}$   $\text{вт}/\text{см}^2 \cdot \text{мк}$ , что также пре-восходит спектральную плотность солнечного лучистого потока в сотни миллионов раз.

#### 4. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ НЕКОТОРЫМИ ЕДИНИЦАМИ ИЗМЕРЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫМИ В ТЕХНИКЕ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ

В литературе по квантовым приборам встречаются различные единицы измерения. На рис. 1.8 приведена номограмма, которая показывает, каким образом связаны единицы измерения физических величин и как довольно просто оценить приблизительное значение той или иной величины для любого оптического генератора, длина волны излучения которого приведена на номограмме [9].

По оси ординат номограммы отложены длины волн в микронах ( $\text{мк}$ ), ангстремах ( $\text{\AA}$ ) и метрах, по оси абсцисс — частота в герцах и терагерцах ( $1 \text{ ТГц} = 10^{12} \text{ Гц}$ ), соответствующее волновое число в  $\text{см}^{-1}$  и энергия в джоулях и электронвольтах.

На проходящей через всю номограмму толстой линии нанесены тонкие линии с изломами, отмечающие излучение наиболее важных активных материалов, которые используются в оптических квантовых генераторах. Так, например, показаны две линии, соответствующие излучению генератора на рубине, и пять линий, соответствующих излучению генератора на гелий-неоновой смеси. На эту номограмму можно нанести длины волн излучения любого нового активного вещества.

Кроме оси абсцисс и ординат имеются две дополнительные шкалы, на которых отложена ширина спектральной полосы излучения оптического генератора в ангстремах и герцах. Эта шкала позволяет определить, какое изменение частоты соответствует изменению длины волны, излучаемой активным веществом на  $1 \text{ \AA}$ . В качестве примера берется рубин и через номограмму проводится горизонтальная прямая, так чтобы она пересекла толстую линию в точке пересечения ее тонкой линией активного вещества. Эта прямая пересечет вертикальную дополнительную шкалу, причем точка пересечения покажет, что рубин со средней длиной волны в  $6943 \text{ \AA}$  имеет

приращение частоты на длину волны, равное  $6,2 \times 10^{10}$  гц/Å. Это означает, что изменение длины волны оптического квантового генератора на рубине на величину порядка 1 Å эквивалентно сдвигу по частоте на  $6,2 \cdot 10^{10}$  гц.

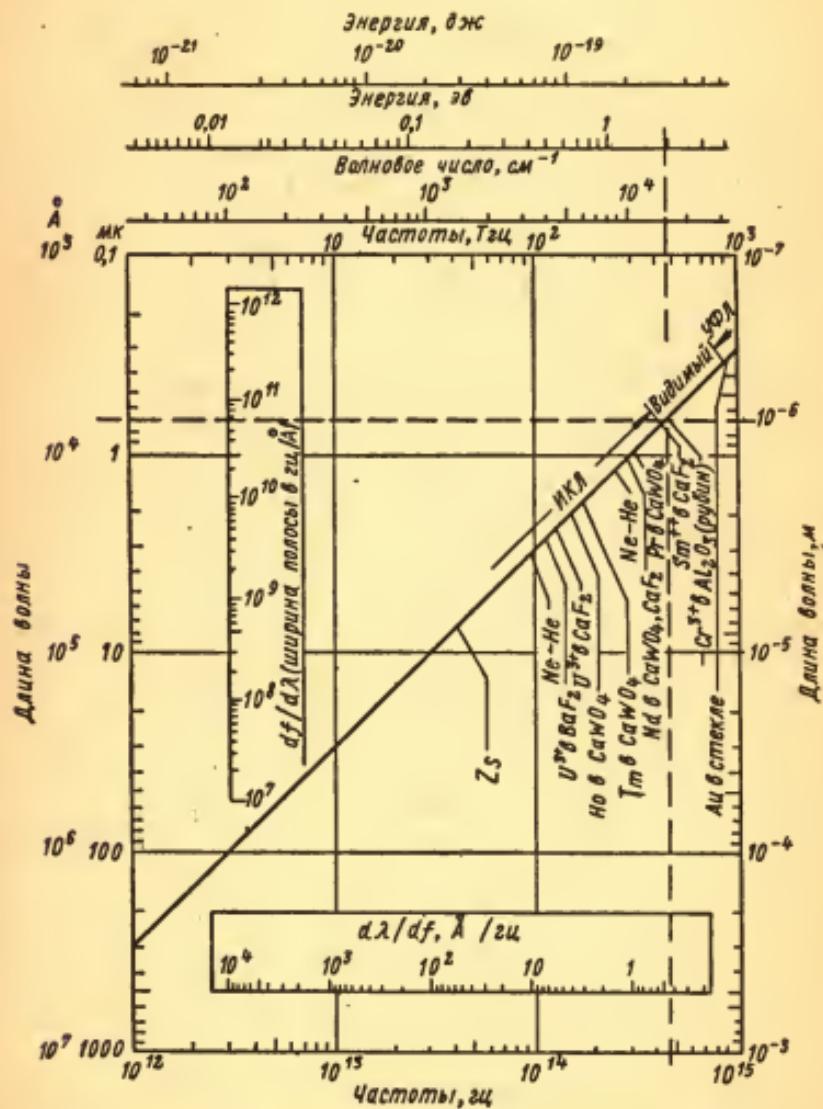


Рис. 1.8. Номограмма, характеризующая соотношения между некоторыми параметрами оптических квантовых генераторов.

Для определения энергии стимулированного излучения и его волнового числа из точки на толстой линии, соответствующей активному веществу, проводят вертикальную прямую, пересечение которой с соответствующими шкалами и дает нужные значения.

Так, например, для рубина энергия составляет около 1,8 эв и соответствует волновому числу 14 400. Кроме того, видно, что при этом волновом числе величина  $1 \text{ см}^{-1}$  соответствует изменению длины волны на 0,48 Å. Зная эту величину, можно легко определить, насколько разнятся между собой частоты излучения генератора на рубине. Так как разница волновых чисел, соответствующих этим частотам, составляет  $29 \text{ см}^{-1}$ , то разница длин волн обоих излучений составляет примерно 14 Å [9].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Phys. Ztschr., 1917, Bd. 18, S. 121, 18.
2. Ангро М. А. Инфракрасные излучения. Госэнергиздат, 1957.
3. Семат Г., Уайт Г. Физика атомного века. Пер. с англ. Госатомиздат, 1961.
4. Троуп Г. Квантовые усилители и генераторы. Пер. с англ., под ред. Т. А. Шмаонова. Изд-во иностранной литературы, 1961.
5. J. Soc. Motion Picture and Telev. Eng., 1962, v. 71, № 11, p. 828—832, 909.
6. Phys. Rev., 1958, 15/XII, v. 12, № 6, p. 1940—1942.
7. Bell Lab. Rec., 1960, XI, v. 38, № 11, p. 403—407.
8. Nature, 1960, v. 187, p. 493.
9. Electronics, 1962, 21/IV, v. 35, № 16, p. 56—57.
10. Лендуэл А. Lasers. New York, 1962.
11. J. Appl. Phys., 1963, v. 34, № 11, p. 3200—3204.
12. Z. Phys., 1963, J. 176, № 3, S. 187—206.
13. Appl. Phys. Letters, 1963, v. 3, № 11, p. 197—199.

## ГЛАВА ВТОРАЯ

### ЭЛЕМЕНТЫ, УСТРОЙСТВО И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ

#### 1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ

В основу устройства оптических квантовых генераторов и усилителей положена принципиальная схема, приведенная на рис. 1.6, согласно которой основными элементами этих приборов являются: активное вещество, стражающие поверхности, образующие объемный резонатор, источник возбуждения и источник питания. Кроме этих основных элементов в аппаратуру, использующую оптические квантовые приборы, в качестве основных элементов входят также модулирующие и детектирующие устройства.

Рассмотрим особенности устройства и назначение отдельных элементов квантовых приборов.

#### 2. АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ

Активные вещества, которых в настоящее время насчитывается более пятидесяти, можно разбить на следующие группы: твердые, газовые и жидкостные. В соответствии с этим и оптические квантовые генераторы приобретают название, соответствующее состоянию их активного вещества (твердый, газовый и другие оптические квантовые генераторы).

##### Твердые активные вещества

*Кристаллические вещества.* Наиболее изученными в серии твердых активных веществ являются материалы, имеющие кристаллическую структуру. Из кристаллов

изготавливают стержни с квадратным, шестиугольным или круглым сечением. Боковая поверхность кристалла полируется с оптической точностью. Торцевые поверхности также полируются и часто покрываются отражающими покрытиями. Первым активным веществом, которое использовалось в оптическом генераторе, был рубин [1, 3, 7]. Искусственный рубин представляет собой окись алюминия, в которой часть атомов алюминия замещена атомами хрома. Количество хрома определяется цвет рубина. Бледно-розовый рубин содержит 0,05% хрома, красный — 0,5% [2].

Кристалл рубина растят в печах по методу Вернеля. Полученную заготовку отжигают, а затем обрабатывают, придавая ей форму стержня длиной 4—10 см и диаметром 0,5—1,0 см [5]. Пользуясь другими методами, выращивают кристаллы рубина длиной до 40 см и весом в несколько килограммов [6, 42]. Торцевые поверхности стержня обрабатывают с высокой степенью точности и затем полируют. При обработке торцевых поверхностей их делают параллельными с точностью не менее 3—9 угл. сек и покрывают серебряным или диэлектрическим слоем с высоким коэффициентом отражения.

Кроме рубина большое внимание уделяется также другим кристаллическим материалам, особенно тем, которые позволяют увеличить эффективность выхода и дают излучение на новых частотах оптического диапазона. Выращиваются кристаллы различных галоидных соединений, солей вольфрамовой, титановой и молибденовой кислот и других материалов с примесью редкоземельных, переходных и других элементов (см. табл. 2.1). Кристаллы этих материалов изготавливаются обычно в виде небольших стержней длиной несколько сантиметров. Излучение этих материалов лежит в широком диапазоне, от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области спектра, и может быть как импульсным, так и непрерывным.

Для увеличения эффективности излучения используют кристаллы с покрытиями, нанесенными на боковой поверхности. Например, выращиваются рубиновые кристаллы с сапфировым покрытием, представляющие собой единую структуру с рубином в виде стержня длиной 6,35 см и диаметром 1,12 см. Преломляющее действие, оказываемое оболочкой на лучистый поток источника

возбуждения, увеличивает активность рубиновой сердцевины, а также способствует лучшему охлаждению рубина. Стержни с сапфировой оболочкой по всей длине имеют малую пороговую энергию генерации (50—80 дж) [43].

Существуют различные способы соединения сапфира с рубином [43]. В одном из них в процессе роста кристалла рубина обеспечивается создание сапфировой оболочки вокруг стержня. Другой способ состоит в том, что изготавливают отдельно рубиновый стержень и сапфировую трубку. Затем стержень вставляют в трубку таким образом, что обеспечивается оптически плотное прилегание их друг к другу.

Было показано, что большое значение для характера выходящего излучения имеет ориентация кристалла, т. е. расположение оптической оси кристалла относительно оси стержня [44]. В том случае, если они параллельны, то ориентация нулевая. Стержни с нулевой ориентацией дают круговую или эллиптическую поляризацию луча. Стержни с ориентацией 90° (оптическая ось перпендикулярна оси стержня) дают лучи, поляризация которых имеет одно направление. Стержни с нулевой ориентацией более подходящи для работы при температуре 77° К, а стержни с перпендикулярной ориентацией более подходят для работы при комнатной температуре.

Считается, что при составлении технических условий на рубиновые стержни недостаточно указать на то, что образец должен возбуждаться в оптическом диапазоне. Необходимо перечислить ряд параметров, характеризующих ориентацию кристалла, метод изготовления, допуски на размеры и чистоту обработки поверхности. Для рубина с плоскими параллельными торцами должны быть выполнены следующие требования [45, 76]:

— ориентация оси С должна иметь точность в пределах 10 угл. сек;

— торцевые поверхности должны быть отполированы так, чтобы обеспечить их плоскость до 0,1 длины волны линии натрия;

— отклонения от параллельности торцевых поверхностей не должно превышать 3 угл. сек;

— допуск на отклонение от угла 90° между торцевыми плоскостями и цилиндрической внешней поверхностью  $\pm 1$  угл. сек.

Размеры рубинового стержня и форма его поперечного сечения определяются характером источника возбуждения, конструкцией держателя стержня, способом его охлаждения и оптикой системы возбуждения [1], а также требуемой мощностью излучения.

Проведенные эксперименты [45, 46] показали, что плоскостность непосредственно влияет на ширину луча, а степень параллельности оказывает заметное влияние на пороговую энергию возбуждения.

*Стекло в качестве активного вещества.* Размеры кристаллических активных веществ ограничены возможным ростом кристалла. Следовательно, мощность оптического квантового генератора, использующего в качестве излучателя кристаллический материал, также ограничена. Поэтому ряд организаций США занимается исследованием возможности использования в качестве излучателя различных сортов стекла [12, 49, 50]. Стеклянная активная среда может иметь большие размеры, чем кристаллические, и любую форму, что может обеспечить наибольшую эффективность прибора.

Так, например, был разработан генератор на стекле с примесью трехвалентного неодимия [11, 12]. Длина обработанного стержня составляла 45 см, а диаметр 6,35 мм. Один конец стержня был изготовлен в виде призмы, т. е. для усиления в системе использовался эффект полного внутреннего отражения. Другой конец стержня не имел отражающего покрытия.

Было получено когерентное излучение на волне 1,015 мк и в литий-магний-алюминиево-силикатном стекле, активированном иттербием, а также на силикатном стекле, активированном гадолинием [13]. Излучение наблюдалось на волне 3125 $\text{\AA}$ , ширина линии излучения составляла 55 $\text{\AA}$ , возбуждение производилось на волне 2700—2800 $\text{\AA}$ .

Получено стимулированное излучение и от стекловолокна, активированного неодимием [14, 15]. Это стекловолокно, собранное в жгут, наматывали на катушку и надевали на источник возбуждения. Такое устройство не требует отражающей системы и может работать с малыми по размерам источниками возбуждения. Генерация получена при комнатной температуре, энергия на выходе составляет 40 дж [51].

*Пластмассы в качестве активного вещества.* Для получения стимулированного излучения могут быть использованы пластические массы [116]. В этом случае активному веществу может быть придана какая угодно форма, начиная от тонких волокон и плоских листов до более сложных конструкций.

Впервые стимулированное излучение было получено от активного вещества, содержащего клешневидные молекулы, активированные трехвалентным европием. Активное вещество помещалось в пассивную среду, в качестве которой был использован полиметилметакрилат [115].

Из этого материала было приготовлено оптическое волокно, длина которого составляла 50 см, а диаметр 1 мм. Волокно, собранное в жгут, помещали в охлаждающую установку. В качестве источника возбуждения был применен источник ультрафиолетового излучения, который обеспечивал возбуждение активного вещества импульсами света с длиной волны 3400 Å. Длительность этих импульсов составляла 250 мксек. Энергия ультрафиолетового излучения поглощалась клешневидными молекулами и передавалась атомам европия, которые возбуждались, а при переходе в нормальное состояние излучали энергию на волне 6130 Å. При прохождении излучения вдоль волокна происходило значительное усиление его за счет участия в излучении других активных частиц.

Излучение наблюдается с обоих концов жгута в виде импульса когерентного света. Спектральная ширина полосы составляла 15 Å.

Ранее предпринимавшиеся попытки получить стимулированное излучение от европия, находящегося в неорганических средах, не привели к успеху и только использование в качестве активной среды органического полимера привело к получению такого излучения от пластмассы. Это дало исследователям надежду, что и самарий и тербий, с трудом дающие вынужденное излучение в неорганических средах, будучи введены в клешневидную молекулярную структуру в пластмассе, обеспечат стимулированное излучение [116].

Кроме того, разработаны и исследованы новые пластические активные материалы, так называемые хелаты.

Таблица 2.1

Активное вещество	Длина волны, $\mu\text{м}$	Частота, $T_{\text{Гц}}$ ( $17T_{\text{Гц}} = 10^{12} \text{ Гц}$ )	Излученная мощность, $\text{вт}$
Рубин с примесью трехвалентного хрома . . . . .	0,6929 0,6943 0,6996 0,7041	433,0 432,0 428,8 426,1	$10^7$
Фтористый стронций с примесью двухвалентного самария . . . . .	0,6961	431,0	
Фтористый кальций с примесью двухвалентного самария . . . . .	0,7092	423,0	
Фтористый стронций с примесью трехвалентного неодимия . . . . .	1,0373 1,0471	289,9 286,5	0,01
Вольфрамат кальция с примесью празеодимия . . . . .	1,0391	288,7	
Фтористый кальций с примесью трехвалентного празеодимия . . . . .	1,0453	287,0	
Фтористый стронций с примесью трехвалентного неодимия . . . . .	1,0471	286,5	
Вольфрамат кальция с примесью трехвалентного неодимия . . . . .	1,0582 1,0604 1,0608 1,0615 1,0638 1,6420 1,0653	283,5 282,9 282,8 282,6 282,0 281,9 281,6	
Молибдат стронция с примесью трехвалентного неодимия . . . . .	1,0593 1,0612 1,0638 1,0745 1,0649	283,2 282,7 282,0 281,8 281,7	
Молибдат свинца с примесью трехвалентного иодидия . . . . .	1,0593	283,2	
Фтористый барий с примесью трехвалентного неодимия . . . . .	1,0638	282,0	
Молибдат кальция с примесью трехвалентного неодимия . . . . .	1,0657	281,5	
Фтористый кальций с примесью двухвалентного туния . . . . .	1,1252	266,6	
Вольфрамат кальция с примесью трехвалентного эрбия . . . . .	1,6120	186,1	
Вольфрамат кальция с примесью трехвалентного туния . . . . .	1,9108	157,0	
Фтористый стронций с примесью туния . . . . .	1,9736	149,5	

Продолжение табл. 2.1

Активное вещество	Длина волны, мк	Частота, Гц (1 Гц = $10^{12}$ сц)	Излученная мощность, вт
Вольфрамат кальция с примесью трехвалентного гольмия . . . . .	2,0477 2,0618	146,5 145,5	
Фтористый кальций с примесью трехвалентного гольмия . . . . .	2,0935	143,3	
Фтористый кальций с примесью двухвалентного диспрозия . . . . .	2,3603	127,1	$10^2$
Фтористый кальций с примесью трехвалентного урана . . . . .	2,4793 2,0000	121,0 120,0	
Фтористый барий с примесью трехвалентного урана . . . . .	2,6087	111,50	
Стекло с примесью золота . . . . .	0,3125	960,0	
Ферроглас с примесью самария . . . . .	0,6450	465,1	
Ферроглас с примесью европия . . . . .	0,6450	465,1	
Бариевый крон с примесью неодимия	1,0638	282,0	
Литий-магний-алюминио-силикатное стекло, активированное тербием .	1,0150	311,4	

В качестве основы в них применяется люсит и плексиглас. Активирование производится европием (а также тербием и самарием). Активное вещество изготавливается в виде волокна, толщина которого составляет 1,5 мм, а длина около 375 мм. Пучок волокна сворачивается в виде жгута и охлаждается до температуры жидкого азота. Возбуждение активного вещества производится импульсами ультрафиолетового излучения. Основным достоинством нового активного материала является его низкая стоимость и способность принимать любую форму. Считают, что активное вещество может работать и в непрерывном режиме [84, 85, 86].

В табл. 2.1 [132] приведены материалы, используемые в качестве активных веществ, и их некоторые характеристики излучения.

### Газовые активные вещества

Применение в качестве активного вещества в оптических генераторах газовых сред облегчает получение непрерывного стимулированного излучения, поскольку

для перевода вещества в возбужденное состояние в этом случае требуется меньшая энергия. Впервые в качестве газового активного вещества применялась смесь гелия и неона [4].

Генератор на смеси газов состоит из тех же основных элементов, что и генератор на рубине, т. е. из активного вещества, объемного резонатора, источника возбуждения и источника питания [55]. Однако необходимо отметить их некоторые особенности. Схема излучающей головки газового ОКГ приведена на рис. 2.1. В качестве активного вещества используется смесь ге-

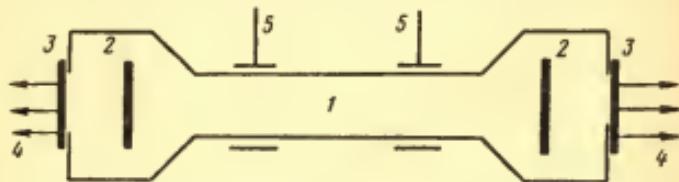


Рис. 2.1. Схематическое изображение излучающей головки газового ОКГ:

1 — газоразрядная трубка, 2 — полупрозрачные зеркала, образующие объемный резонатор, 3 — выходные окна, 4 — излучение, 5 — электроды для подвода высокочастотного возбуждающего поля.

лия и неона, заключенная в газоразрядную трубку. Для заполнения смесью газов трубка сначала откачивается до определенного вакуума, а затем заполняется газовой смесью в требуемой пропорции. Зеркала, образующие объемный резонатор, устанавливаются с концов газоразрядной трубки и имеют возможность юстироваться друг относительно друга [5]. Возбуждение газового разряда производится высокочастотным полем, которое подводится к трубке с помощью внешних электродов от специального генератора. Обычно используется диапазон частот от 24 до 30 Мгц.

Стимулированное излучение гелий-неоновой смеси обеспечивается следующим образом. Атомы гелия в процессе газового разряда возбуждаются и совершают переход на верхний безызлучательный уровень (рис. 2.2). При столкновении атомов гелия с атомами неона последние возбуждаются и совершают переход на один из четырех верхних метастабильных уровней. Переход атомов неона с верхнего уровня на один из десяти возможных промежуточных энергетических уров-

ней сопровождается излучением в инфракрасном диапазоне. В последнее время было получено излучение в видимой области на волне 0,6328 Å [17].

Направленность излучения генератора на смеси газов, т. е. ширина луча, составляет доли угловой минуты [5, 6]. Излучение обладает высокой монохроматич-

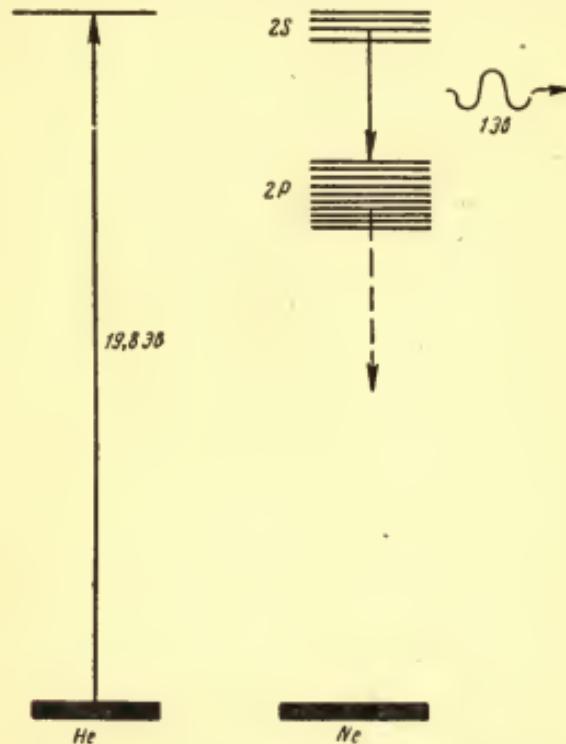


Рис. 2.2. Схема энергетических уровней гелия и иона.

ностью и когерентностью. Так, например, ширина спектральной линии газового генератора в  $10^4$  раз меньше, чем ширина линии излучения генератора на рубине. Мощность, излучаемая генератором, составляет 0,01—1,0 вт при потребляемой мощности порядка 50—80 вт. Основное достоинство генератора на смеси газов заключается в непрерывности его излучения.

В последнее время был предложен новый метод получения когерентного излучения, основанный на диссо-

циативной передаче возбуждения [18]. В этом случае в качестве активного вещества используется смесь благородного газа с двухатомным газом. Возбужденный атом благородного газа при соударении с молекулой двухатомного газа разбивает ее на два атома. Один из атомов при этом возбуждается до более высокого энергетического уровня, в то время как другой поглощает оставшуюся энергию. Этим исключается необходимость выравнивания энергетических уровней обоих газов, как в генераторе на смеси гелий-неон. Это является известным преимуществом, так как появляется возможность использовать большее количество газов.

Были разработаны два кислородных квантовых генератора [57, 58]: один на смеси кислорода с аргоном с отношением давлений 1:40, другой — на смеси кислорода с неоном с отношением давлений 1:70. Оба генератора излучают на волне 8445 Å. Выходная мощность примерно 2 мвт.

Используется как активное вещество и однокомпонентный газ [19, 56]. От газовых генераторов, работающих на гелии, неоне, аргоне, криптоне и ксеноне, получено непрерывное когерентное излучение на 14 различных длинах волн. Характерным свойством таких генераторов является то, что возбуждение их осуществляется постоянным напряжением, подводимым к двум электродам. За счет непрерывного дугового разряда между электродами возникают свободные электроны, которые непосредственно возбуждают атомы газа, поднимая их на более высокий энергетический уровень, с которого они переходят на нижний уровень, создавая когерентное излучение.

В табл. 2.2 [131] приведены основные параметры газовых оптических квантовых генераторов.

В качестве активного вещества может быть использован и водород, переходящий из состояния «пара» в состояние «ортого». Генератор с таким активным веществом работает при сверхнизкой температуре и обладает большими размерами, что позволяет получать мощность порядка мегаватт. Размеры такого генератора такие же, как и размеры большого военного прожектора. Предполагают [20], что такой генератор будет сделан в 1970 г.

Таблица 2.2

Активное вещество	Длина волны, мк	Частота, Гц	Излучаемая мощность, вт
Гелий-неон	0,6328	474,1	$3 \cdot 10^{-3}$
	1,114	268,3	
	1,153	260,1	$10 \cdot 10^{-3}$
	1,160	258,6	
	1,198	250,2	
	1,207	248,5	
Неон-кислород	0,8445	355,1	
Аргон-кислород	0,8445	355,1	$2 \cdot 10^{-3}$
Гелий	2,0603	145,6	$3 \cdot 10^{-3}$
Неон	2,1019	142,3	$1 \cdot 10^{-3}$
Аргон	1,618	185,4	$0,5 \cdot 10^{-3}$
	1,694	177,1	
	1,793	167,7	
	2,0616	145,5	
	1,690	177,5	
	1,694	177,1	
Криптон	1,784	168,1	
	1,819	164,4	
	1,921	156,1	
	2,116	141,8	
	2,189	137,1	$1 \cdot 10^{-3}$
	2,0261	149,5	$5 \cdot 10^{-3}$
Цезий	7,180	041,78	$0,05 \cdot 10^{-3}$

Недавно получено стимулированное излучение от четырех новых газовых компонентов: азота, брома, окиси углерода и шестифттористой серы. Общее число длин волн, излучаемых газовыми генераторами, превысило 150 и охватывает диапазон от 0,594 до 35 мк.

### Жидкостные активные вещества

Одним из преимуществ жидкостных оптических генераторов по сравнению с кристаллическими является простота их изготовления. Кроме того, в таких оптических генераторах облегчается охлаждение активного вещества путем циркуляции самой жидкости в приборе. Предполагают, что приборы с жидкими активными веществами будут характеризоваться большими мощностями излучения. Одна из американских фирм разработала метод получения жидких активных веществ с различными примесями гадолиния, неодимия и самария [59, 60, 77].

При экспериментах по получению стимулированного излучения жидкий материал помещался в резонатор со сферическими зеркалами, подобный тому, который используется для газовых генераторов. Если прибор работал в импульсном режиме, то специального охлаждения его не требовалось. При работе генератора в непрерывном режиме активное вещество охлаждалось, циркулируя по охлаждающей и рабочим системам [31].

Был также создан жидкостный квантовый генератор, в котором активное вещество было активировано тербием. При возбуждении активного вещества ультрафиолетовым излучением генератор работал в диапазоне 5100—5800 Å (зеленая часть спектра). Электромагнитные колебания такой частоты хорошо проникают в воду на большие глубины, что представляет большой интерес для применения генераторов под водой.

Получено также стимулированное излучение от жидкого раствора индолила (при температуре 77° К), суспензированного в твердой стеклянной матрице из этилового эфира, изопентана и этанола [61].

Новый оптический генератор, действие которого основано на эффекте Рамана [87], был создан осенью 1962 г. \*

В новом оптическом генераторе в качестве источника монохроматического света применялся генератор на рубине [87]. Кювета с жидкостью помещалась внутри объемного резонатора рядом с рубиновым стержнем. Кроме того, там же размещался электрооптический затвор, использующий ячейку Керра, который предназначался для получения импульсов мощностью до десятков мегаватт при длительности порядка 3—30 нсек. Это излучение, длина волны которого составляла 6943 Å, направлялось на кювету с органической жидкостью. На выходе из кюветы наблюдалось когерентное излучение на нескольких длинах волн. Частоты этого излучения

\* Этот эффект был обнаружен индийским физиком Раманом (и одновременно с ним советскими физиками Ландсбергом и Мандельштамом) в 1928 г. и состоял в том, что в результате облучения жидкостей одной монохроматической волной вторичное излучение на выходе жидкости состояло из некоторого количества монохроматических волн, причем разница между падающей длиной волны и длиной волны выходящего света являлась константой жидкости.

равняются сумме или разности частот падающего излучения и частот собственного колебания молекул в инфракрасном диапазоне. В табл. 2.3 [133] приведены исследованные жидкости и перенизлучаемые ими длины волн.

Таблица 2.3

Исследованная жидкость	Длина перенизлучаемой волны, Å
Дейтерий-бензол	7430, 7990
Пиридин	7457, 8053
Толуол	7463
Нитробензол	7658, 8539, 9632
Бром-нафталин	7672
Циклогексан	8658
Бензол	7455, 8819, 8052

Стимулированное рамановское излучение наблюдается только тогда, когда мощность рубинового генератора превосходит определенное пороговое значение. Выходное излучение составляет 20—30% от первичного излучения, а ширина его спектральной линии около 0,3 Å [22]. Угловой раствор излучения составляет несколько миллирадиан. Основное достоинство этого генератора состоит в возможности быстрой перестройки излучаемой длины волны путем замены жидкости в кювете.

Считают, что таким путем можно получить стимулированное излучение и от твердых тел. Тогда в недалеком будущем могут быть созданы оптические квантовые генераторы на любые дискретные частоты.

#### Полупроводниковые материалы в качестве активного вещества

В декабре 1962 г. [16, 52, 53, 54] были созданы первые полупроводниковые оптические квантовые генераторы \*.

\* На возможность использования полупроводниковых материалов в оптических квантовых генераторах было указано в статье Н. Г. Басова, Б. М. Вула и Ю. М. Попова, опубликованной в ЖЭТФ, 1959, т. 37, вып. 2, стр. 587—588.

Физика оптического излучения полупроводника состоит в следующем. Энергетический спектр полупроводника представляет собой энергетические зоны (рис. 2.3): заполненную, или валентную зону и свободную, или зону возбуждения. Между ними расположена запрещенная зона. Несмотря на наличие этой зоны, полупроводник обладает электропроводностью. Это объясняется

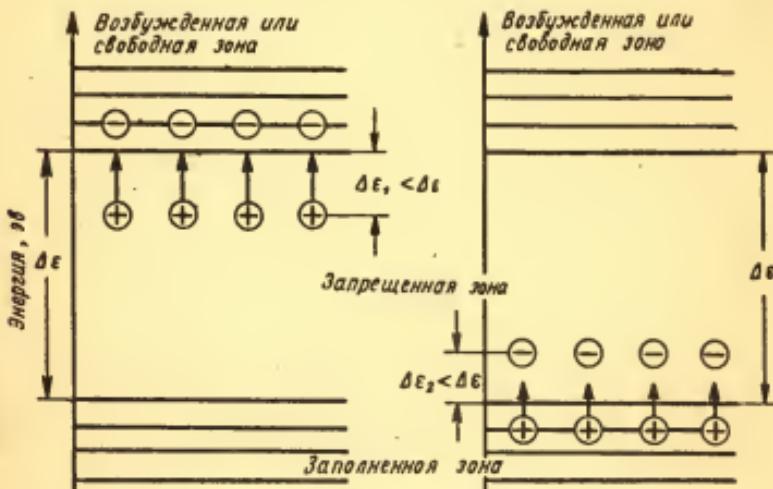


Рис. 2.3. Энергетический спектр электронного и дырочного полупроводника.

тем, что в нем всегда имеется некоторое количество свободных одиночных атомов или ионов, не вошедших в систему кристалла и не закрепленных в узлах кристаллической решетки, которые появляются в полупроводнике из-за наличия посторонних примесей. Эти примеси вызывают появление в запрещенной зоне отдельных локальных энергетических уровней (уровней Тамма), которые как бы сужают эту зону. Электроны примесных уровней в случае, если они расположены ближе к зоне возбуждения, способны преодолеть зону  $\Delta\varepsilon_1 < \Delta\varepsilon$  и перейти в зону возбуждения. При этом образуется избыток электронов.

Если примесные уровни находятся ближе к заполненной зоне, то электроны, переходя на локальные уровни, оставляют в заполненной зоне свободные уровни — «дырки». При этом возникает избыток «дырок». Таким

образом, наличие примесей способствует образованию локальных уровней, что приводит к перенаселенности возбужденной зоны электронами, а заполненной зоны — «дырками». При рекомбинации электрона с «дыркой», т. е. при переходе электрона из возбужденной зоны в заполненную, выделяется энергия в виде кванта светового излучения (фотона) или в виде кванта звукового излучения (фонона) [124]. При пропускании через полупроводник электрического тока возникает большое ко-

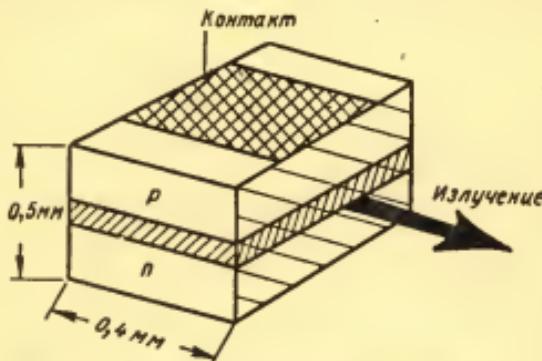


Рис. 2.4. Схематическое изображение полупроводникового диода.

личество рекомбинаций и наблюдается интенсивное излучение [125, 126].

При малых плотностях тока через  $p-n$  переход интенсивность излучения невелика, излучение некогерентно и немонохроматично. При увеличении плотности тока выше некоторого критического значения, когда число фотонов, возникающих при рекомбинации, превышает число фотонов, поглощаемых в веществе, излучение становится когерентным, ширина спектральной линии излучения сужается [89], а интенсивность излучения резко возрастает [90].

Кроме того, для получения когерентного излучения необходимо, чтобы полупроводниковый переход был плоским, а материал полупроводника — чрезвычайно однородным.

Полупроводниковый диод изготавливается либо в виде заготовки, имеющей форму куба, либо в виде параллелепипеда (рис. 2.4), две противоположные грани которого делаются параллельными и обрабатываются

с высокой точностью. Чистота обработки соответствует  $\lambda/5$  —  $\lambda/10$ . Две другие грани служат контактами, к которым прикладывается напряжение. Размеры диода невелики и не превышают  $0,5 \text{ mm}^3$ .

Для получения излучения к контактным пластинам диода прикладывается напряжение импульсами длительностью от 5 до 20 мсек. Интенсивность и характер спектрального распределения излучения зависят от величины плотности тока, протекающего через диод.

### 3. ОБЪЕМНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Объемный резонатор, образованный зеркальными поверхностями, предназначается для концентрации электромагнитной энергии требуемой частоты, чем обеспечивается большее время взаимодействия с возбужденными частицами. Он обеспечивает многократное отражение электромагнитной волны, благодаря чему достигается требуемый коэффициент усиления лучистого потока, необходимый для компенсации потерь энергии в активном веществе и на стенках объемного резонатора. Объемный резонатор обеспечивает, так же как селективный контур обратной связи, высокую монохроматичность при генерировании колебаний [25]. Благодаря большой добротности резонатора выходная полоса частот становится узкой по отношению к ширине полосы резонансного излучения активного вещества.

Объемный резонатор, образованный двумя параллельными зеркалами, известен давно под названием интерферометра Фабри — Пере. Теория его работы также широко освещена [23, 91]. Объемный резонатор, используемый в оптическом генераторе, отличается от интерферометра прежде всего тем, что вместо пассивной среды в нем используется активная среда, усиливающая электромагнитное поле, введенное внутрь резонатора.

По конструктивному выполнению объемные резонаторы могут быть следующими:

- резонаторы с использованием рабочего тела излучателя;
- резонаторы с вынесенными зеркалами;
- резонаторы с переменной добротностью [1].

Большинство резонаторов, используемых в оптических квантовых генераторах, образовано двумя плоскими

ми зеркалами, установленными друг против друга. Эти зеркала имеют серебряное либо диэлектрическое отражающее покрытие, состоящее из нескольких слоев диэлектрика, каждый из которых обладает различными оптическими характеристиками. По сравнению с диэлектрическим покрытием серебро имеет меньшую отражательную способность, и это приводит к сравнительно большим потерям, особенно в том случае, когда оно применяется для покрытия торцов кристалла рубина, работающего на большом уровне мощности. Кроме того, в процессе эксплуатации серебряные покрытия портятся и их необходимо заменять, так как выходная мощность генератора начинает падать, а энергия, необходимая для генерации, растет. Диэлектрические покрытия при эксплуатации не ухудшают своих свойств и им в настоящее время отдают предпочтение.

Уравнение объемного резонатора для оптического генератора и его анализ приведены в работе [24]. Здесь же приводятся лишь выводы, сделанные в этой работе:

— многослойные диэлектрические отражающие покрытия, обеспечивающие меньшие потери энергии, способствуют получению большой выходной энергии от кристаллов по сравнению с серебряным покрытием;

— при импульсных разрядах источника энергии малой мощности, когда максимальное значение коэффициента усиления невелико, можно ожидать высокую направленность излучения. Наоборот, при высоких энергиях и больших значениях коэффициента усиления будет наблюдаться увеличенное угловое расхождение;

— кристаллы, имеющие высокоотражающие диэлектрические покрытия, способны обеспечить малое угловое расхождение и более высокий уровень выходной мощности по сравнению с посеребренными кристаллами. Однако существует определенный предел, зависящий от поглощения и рассеяния внутри кристалла;

— резонатор с высокой добротностью способен обеспечить большую интенсивность и более высокую направленность когерентного излучения при сравнительно низком пороге энергии возбуждения.

Трудности точной юстировки одного плоского зеркала относительно другого привели к тому, что стали использовать не плоские зеркала (рис. 2.5,а), а сферические [1, 62, 63]. Резонатор, образованный двумя сфе-

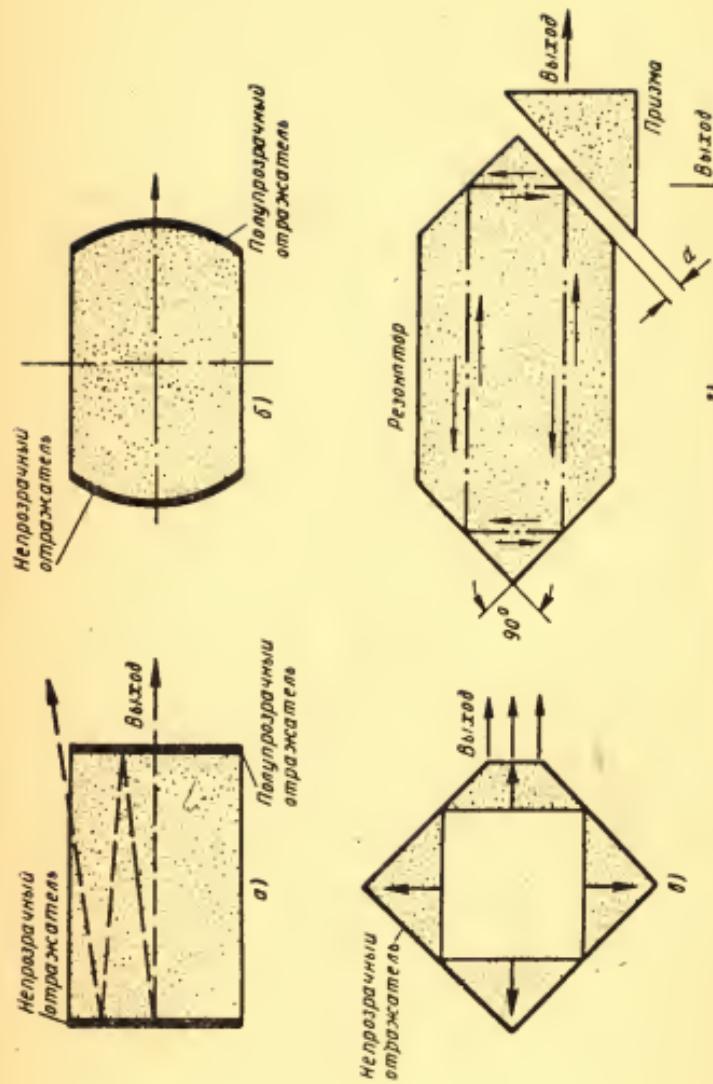


Рис. 2.5. Типы резонаторов:

а — резонатор, образованный плоскогоризонтальными зеркалами, нанесенными на активном веществе; б — резонатор, образованный сферическими зеркалами; в — резонаторы с полным внутренним отражением.

рическими зеркалами, которые расположены друг от друга на расстоянии, равном удвоенному радиусу их кривизны, показан на рис. 2.5,б. Этот резонатор по сравнению с резонатором, образованным плоскопараллельными зеркалами, имеет меньшие дифракционные потери и требует более низкой мощности возбуждения; кроме того, юстировка сферических зеркал более легко выполняется.

Иногда одно из зеркал, образующих объемный резонатор, заменяют призмой, устанавливаемой так, чтобы обеспечить полное внутреннее отражение. На рис. 2.5,в, г показаны схемы резонаторов, обеспечивающих полное внутреннее отражение [64].

В последнее время стали пользоваться резонаторами с вынесенными зеркалами. В этом случае активное вещество обрабатывается и полируется, но не покрывается серебром или диэлектриком. Зеркала, образующие объемный резонатор, изготавливаются отдельно от активного вещества. Затем активное вещество и зеркала объединяют в единой конструкции, которая предусматривает юстировочное приспособление, обеспечивающее возможность установки одного зеркала параллельно другому с высокой точностью.

Иногда между активным веществом и одним из зеркал помещают оптическое устройство с регулируемой прозрачностью. Это обеспечивает возможность регулировать добротность объемного резонатора в широких пределах и, следовательно, управлять излучением генератора [65, 8, 40, 41].

#### 4. МЕТОДЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ (НАКАЧКИ)

Возбуждение активного вещества, или, как его иногда называют, «накачка» (pumping), в зависимости от характера воздействия на активное вещество можно осуществить следующими методами:

- с помощью оптического излучения;
- с помощью газового разряда;
- потоком электронов;
- потоком радиоактивных частиц.

Наибольшее распространение получили два первых метода. Первый метод применяется, в основном, в генераторах, в которых в качестве активного вещества

используются твердые тела, второй — в генераторах с газообразным активным веществом.

Система возбуждения, использующая для воздействия на активное вещество *оптическое излучение*, обычно состоит из двух основных элементов: источника света и рефлектора, концентрирующего излучение на активном веществе. Если источник света представляет собой

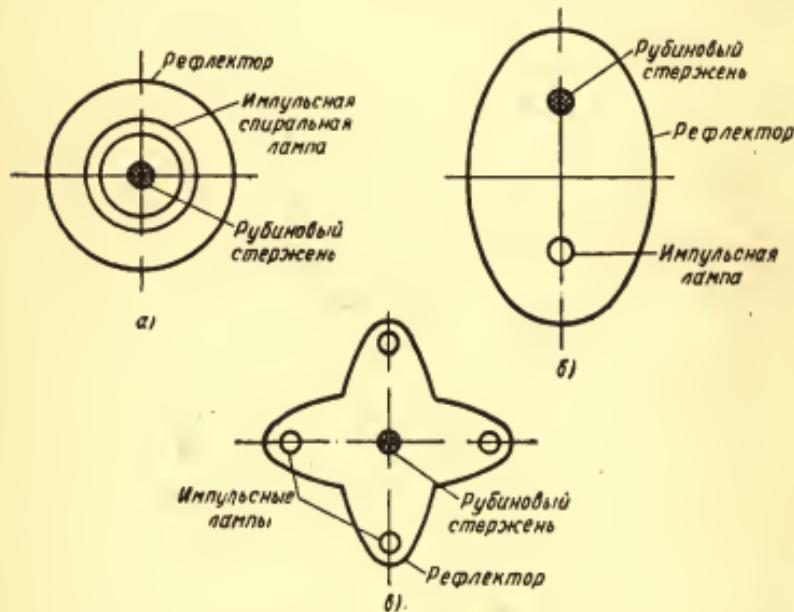


Рис. 2.6. Типы рефлекторов:  
а — цилиндрического типа; б — эллиптического типа; в — полиэллиптического типа.

газоразрядную спиральную лампу, то рефлектор обычно выполнен в виде цилиндра (рис. 2.6,а). Если же источником света является газоразрядная лампа цилиндрического типа, то рефлектор выполнен в виде эллиптического цилиндра (рис. 2.6,б), по одной фокальной оси которого располагается лампа, по другой — рубиновый стержень [1]. При таком расположении источника света и рубинового стержня весь световой поток от лампы, отразившись от эллиптической поверхности отражателя, соберется в другой фокальной оси, т. е. там, где расположен рубиновый стержень.

Значительное увеличение концентрации энергии возбуждения на активном веществе может быть получено при использовании рефлектора, имеющего полиэллиптическое сечение (рис. 2.6,в). В этом случае расположенный вдоль общей фокальной линии рубиновый стержень может облучаться одновременно несколькими лампами возбуждения, установленными вдоль других фокальных линий. Наилучшими условиями для полного использования энергии возбуждения лампы в таком отражателе будут:

- возможно больший размер поперечного сечения эллиптического отражателя;
- минимальный диаметр лампы;
- минимальный диаметр стержня активного вещества.

В этом случае, при небольших допущениях, можно считать, что поток энергии на поверхности активного вещества постоянный и не зависит от направления [82, 83].

Экспериментальное исследование работы такого рефлектора [66, 67] показало, что он эффективно работает в том случае, когда диаметр излучающей части лампы возбуждения не превышает диаметра рубинового стержня и значительно меньше размеров поперечного сечения рефлектора (что исключает aberrации). Установлено, что оптимальным вариантом является рефлектор четырехэллиптического сечения. При соответствующем выборе размеров резонатора эффективность каждой из четырех ламп, согласно проведенным расчетам, составляет 75% от эффективности лампы оптического квантового генератора, имеющего моноэллиптическое сечение рефлектора [68].

Был изготовлен рефлектор четырехэллиптического сечения, который использовался при экспериментах по оптической локации Луны. Рефлектор имел длину 150 мм, определяемую размерами ламп. Размеры сечения составляли  $406 \times 406$  мм, отношение длин полуосей эллипсов 0,625 [66, 67].

В качестве источников возбуждения используются ксеноновые лампы-вспышки, которые рассчитаны на работу при различных выходных энергиях. Так, например, спиральные лампы типа FT-506 и FT-524 фирмы General Electric обеспечивают энергию 650 и 1 500 дж соответ-

ственno [26]. Спиральные лампы могут быть изготовлены с бифилярной навивкой, что обеспечивает размещение выводов с одной стороны лампы.

Одна из систем возбуждения позволяет устанавливать 4, 6 или 10 ламп-вспышек в зависимости от диаметра рубинового стержня. Конструкция системы предусматривала возможность перемещения ламп для обеспечения необходимого зазора между лампами и кристаллом. Это позволяло улучшить охлаждение кристал-

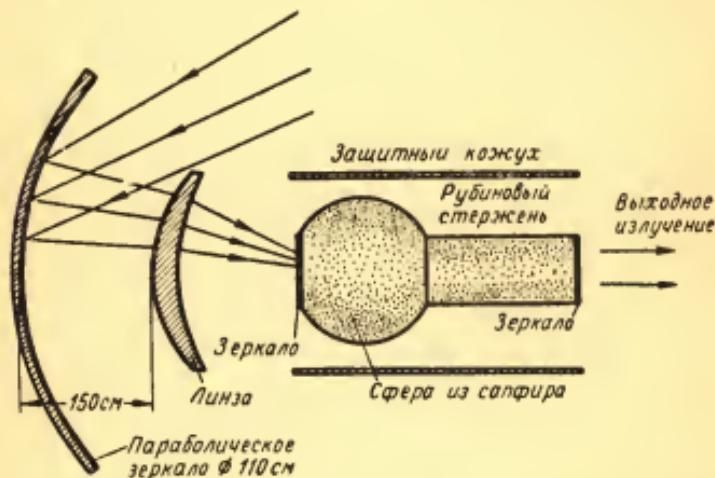


Рис. 2.7. Схема возбуждения ОКГ солнечной энергией.

ла. Группа ламп-вспышек закрывалась алюминиевым отражателем для улучшения концентрации света на кристалле.

Примером существенной модернизации системы оптического возбуждения является конструкция, описанная в [28]. В этой системе активное вещество и лампа-вспышка представляют собой единое целое: активное вещество является как бы оболочкой лампы-вспышки. Кристаллы или активированное стекло изготавливаются в виде цилиндрического стержня. Полость внутри стержня заполняется газом (смесью ксенона и аргона), разряд которого обеспечивает возбуждение активного вещества. Поверхность кристалла, за исключением излучающего торца, покрывается диэлектриком для уменьшения потерь энергии.

Такие системы возбуждения значительно эффективнее ранее использовавшихся. Они характеризуются порогом срабатывания в 2—5 раз меньшим, чем порог для обычных систем возбуждения.

Разрабатывается и ряд других методов, например, методы солнечного возбуждения, возбуждение энергией взрывающейся проволоки и катодо-люминесцентное возбуждение [12, 68].

На рис. 2.7 показана система возбуждения, использующая солнечную энергию. Излучение Солнца собирается параболическим зеркалом диаметром до 110 см и направляется линзой на сапфировую сферу, примыкающую одной стороной к торцу рубинового стержня. Солнечная энергия концентрируется сапфировой сферой на торцовой поверхности рубинна и переводит ионы хрома рубинна в возбужденное состояние. Стимулированное излучение многократно усиливается в объемном резонаторе, образованном одной из торцовых поверхностей рубинна и плоской поверхностью сапфировой сферы и выводится наружу через полупрозрачную торцовую поверхность рубинна.

На рис. 2.8а показана система возбуждения, основанная на использовании энергии взрывающейся проволоки, которая находится в одном цилиндро-эллиптическом отражателе с рубиновым стержнем [110]. Рубин имеет защитный пирексовый экран, предохраняющий внешнюю поверхность стержня от повреждения каплями расплавленного металла и ударной волной. Проволока взрывается в результате прохождения через нее большого импульса тока от батареи конденсаторов большой емкости. Световая энергия, выделяющаяся при взрыве проволоки, используется для возбуждения рубинна.

При катодо-люминесцентном возбуждении применяется электронно-лучевая трубка, внутрь которой размещается рубиновый стер-

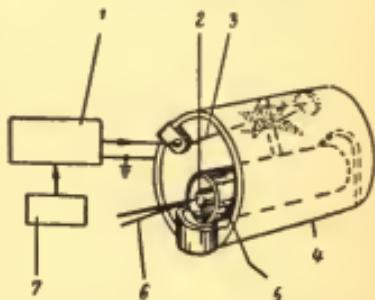


Рис. 2.8а. Система возбуждения рубина энергией взрывающейся проволоки.  
1 — батарея конденсаторов, 2 — рубиновый стержень, 3 — проволока, 4 — отражатель, 5 — пирексовая трубка, 6 — луч, 7 — триггерная схема.

жень (рис. 2.8б). Возбуждение рубина вызывается лучистой энергией, возникающей при люминесценции вещества, покрывающего металлическую цилиндрическую поверхность трубы в результате бомбардировки его потоком электронов. Этот метод возбуждения пригоден для получения как импульсного, так и непрерывного излучения.

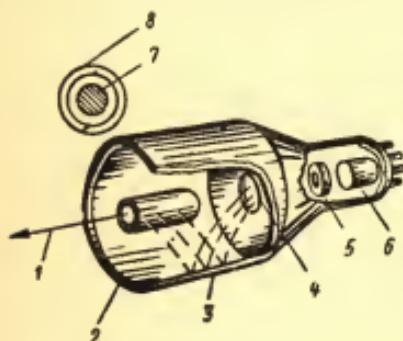


Рис. 2.8б. Система возбуждения, основанная на катодо-люминесценции:

1 — луч, 2 — экран из люминофора, 3 — металлический цилиндр, 4 — тепловой экран, 5 — катод, 6 — электроинийный прожектор, 7 — торцовая поверхность рубина, 8 — защитный экран.

этому средняя подводимая высокочастотная мощность невелика и колеблется в пределах от 10 до 80 вт [1, 78]. Диапазон частот высокочастотного генератора порядка 24—30 Мгц. Энергия подводится по коаксиальному кабелю к электродам двух типов: внешним и внутренним. Внешние электроды охватывают трубку, их количество зависит от ее длины и должно обеспечивать равномерность электрического заряда.

Внутренние электроды размещаются в специальных отростках, приваренных ближе к торцам трубы, поскольку у торцовых участков трубы располагаются зеркала объемного резонатора.

Метод возбуждения потоком электронов используется в оптических генераторах на полупроводниках. Перевод вещества в возбужденное состояние производится мощным потоком электронов через полупроводник. Система возбуждения крайне проста: к двум противоположным сторонам полупроводникового диода, изготовленного в форме куба, импульсами прикладывается

напряжение. Переходный слой, расположенный посередине куба, при протекании по нему тока излучает электромагнитную энергию в инфракрасном диапазоне.

Возбуждение потоком радиоактивных частиц [69, 71] состоит в облучении активного вещества  $\gamma$ -лучами или бомбардировкой его нейтронами. Фирма Martin Marietta Со предполагает создать мощные генераторы, действие которых основано на непосредственном облучении кристаллов  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицами, нейтронами и  $\gamma$ -лучами.

Исследуется возможность создания оптических генераторов с продолжительным сроком службы путем использования самораспада радиоактивного газообразного изотопа, помещенного между отражательными пластинами [33].

## 5. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

Основным источником питания большинства оптических генераторов является промышленная сеть [71], выпрямленное напряжение которой используют для зарядки конденсаторов. В табл. 2.4 [129] приведены данные по источникам питания, выпускаемым в США.

Таблица 2.4

Характеристики	Модель	
	LPS-1	LPS-2
Входное напряжение, в	110—125 (50—60 Гц)	110—125 (50—60 Гц)
Емкость конденсатора, мкФ	1 000	1 000
Зарядное напряжение, в	0—2 000	0—2 000
Время заряда до 1 000 в, сек	15	2
Выходная энергия, дж	0—800	0—2 000
Размеры, см	120×60×50	120×60×50
Вес, кг	140	190

Имеются также образцы генераторов, питающихся от аккумуляторов и солнечных батарей [81, 79]. Однако в связи с тем, что потери электромагнитной энергии оптического диапазона в атмосфере велики и наиболее вероятным местом использования квантовых генераторов, как предполагают, явится космос, проводятся ин-

тенсивные работы по исследованию и созданию бортовых источников питания [32]. Эти источники будут получать дополнительную энергию либо за счет солнечного излучения, либо за счет периодического облучения оптической системы космического аппарата излучением наземных квантовых генераторов.

## 6. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ

Во всех случаях, когда желательно изменить форму луча после его первоначального формирования, используются собирающие и рассеивающие линзы, телескопические системы или зеркальная оптика. Для изменения направления луча под различными углами используются плоские зеркала.

Однако особенности излучения оптических генераторов, а именно, пространственная и временная когерентность, а также возможная высокая плотность излучения в узком пучке привели к тому, что был проведен анализ влияния оптических систем на излучение квантовых генераторов. Одна из работ [30] посвящена выяснению возможностей создания оптических систем, которые в полной мере реализовали бы когерентные свойства оптического квантового генератора, а также взаимодействию света с веществом при высокой фотонной плотности. В работе отмечается, что для решения основной задачи — расширения или сужения поперечного сечения пучка когерентного света на несколько порядков величин — можно использовать преломляющие системы с малым поглощением или отражательные системы, работающие с малыми углами.

Влияние нелинейного эффекта на распространение когерентных волновых фронтов необходимо учитывать лишь в области фокуса. Кроме того, необходимо иметь в виду особенность взаимодействия света с веществом, когда фотонная плотность становится сравнимой с плотностью атомов в твердом теле. Даже в случае, когда длина волны излучения лежит в области малого поглощения для данной преломляющей среды, носители, возбужденные светом до уровня зоны проводимости, могут достигнуть такой концентрации, что преломляющая среда станет отражать подобно металлу.

### Импульсный оптический квантовый генератор на твердом теле

Наиболее разработаны и разнообразны конструкции генераторов на твердых веществах. Все они содержат два основных элемента — излучающую головку и систему питания и управления. Если генератор импульсный, то в этом случае систему питания и управления разделяют на два блока: блок питания и блок запуска. Рассмотрим конструкцию генератора на рубине, поскольку она довольно проста и вместе с тем включает все основные элементы большинства оптических квантовых генераторов [35].

Этот генератор состоит из трех блоков: излучающей головки, блока питания и блока запуска (рис. 2.9). Блок питания обеспечивает энергией заряд двух конденсаторов — основного и вспомогательного, емкости которых составляют 50 и 1 мкФ соответственно. Он состоит из силового трансформатора  $Tp_1$ , кенотрона 2Х2, конденсатора на 50 мкФ и киловольтметра. Напряжение от основного конденсатора подается на электроды ксеноновой лампы-вспышки.

Основным назначением блока запуска является генерирование импульса высокого напряжения и подача его на запускающий электрод лампы-вспышки, чем обеспечивается начальный пробой газа в лампе. Этот блок состоит из трансформатора  $Tp_2$ , выпрямителя  $B$ , вспомогательного конденсатора емкостью 1 мкФ и импульсного трансформатора  $Tp_3$ .

Излучающая головка предназначена для обеспечения условий, необходимых для генерации рубина. Конструктивно она объединяет три элемента: рубиновый стержень, две П-образные лампы-вспышки и рефлектор. Лампы-вспышки устанавливаются параллельно друг другу на специальном плато (рис. 2.10), имеющем захватные держатели ламп. Лампы — стандартные, наполненные ксеноном. Рубиновый стержень располагается между лампами в специальной кварцевой трубке, которая своими концами выходит наружу из металлического каркаса, являющегося основанием всей излучающей головки. Рефлектор (на чертеже не показан) выполнен из алюминиевой фольги и охватывает обе лампы и трубку

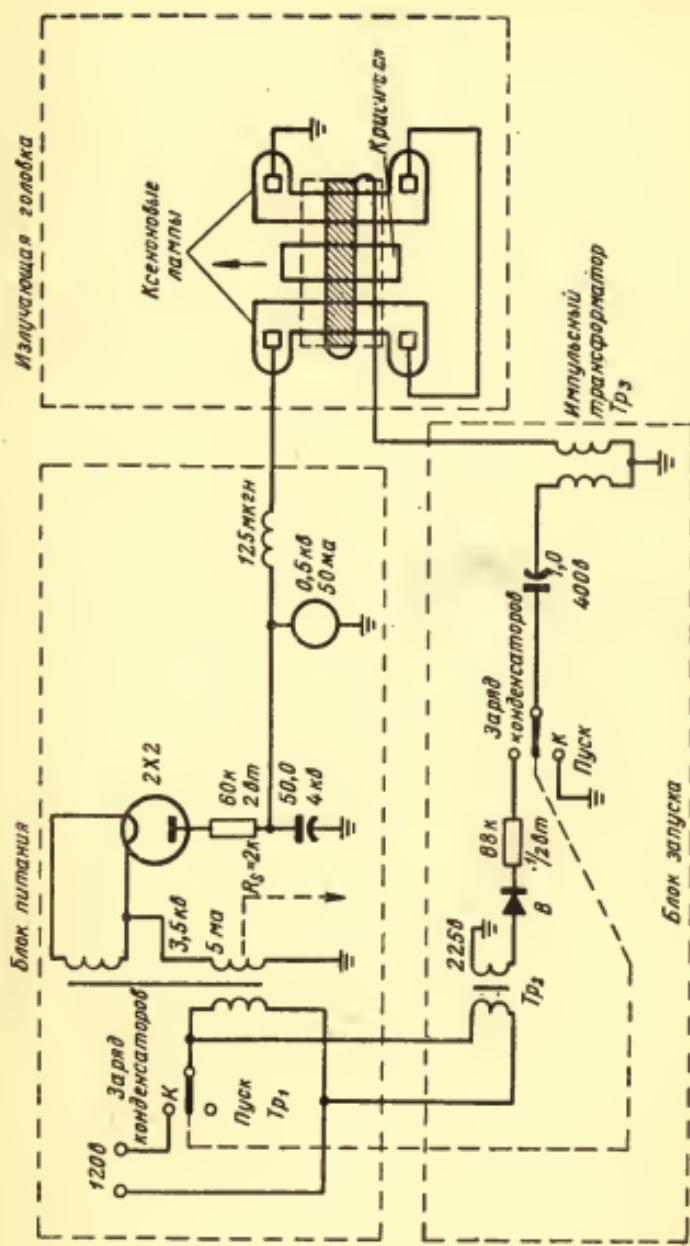


Рис. 2.9. Электрическая схема ОКГ на рубине.

с кристаллом. Сверху головка закрывается защитным кожухом [34].

Схема работает следующим образом. При включении переключателя  $K$  (см. рис. 2.9) в верхнее положение от сети подается напряжение 120 в на трансформа-

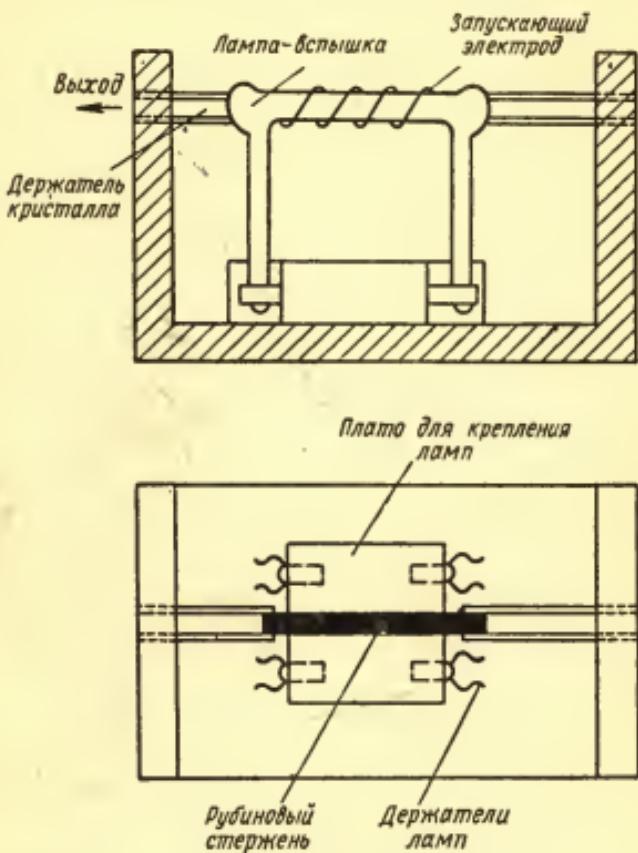


Рис. 2.10. Конструктивное выполнение излучающей головки ОКГ на рубине.

торы  $Tp_1$  и  $Tp_2$ . Со вторичной обмотки трансформаторов напряжение подводится к выпрямителям. Выпрямленным напряжением конденсаторы заряжаются до напряжения  $400 \div 1000$  в, которое контролируется по киловольтметру. Основной конденсатор при этом оказывается подключенным к лампам-вспышкам. Затем переключатель  $K$  перебрасывается в нижнее положение.

В этом случае силовой трансформатор отключается от сети, а вспомогательный конденсатор разряжается через импульсный трансформатор. Поскольку отношение витков в трансформаторе  $T_{p3}$  примерно 1 : 100, то на запускающий электрод подается импульс напряжением до 40 кВ, который и вызывает начальную ионизацию газа в лампах-вспышках. Сопротивление в лампах падает и через них разряжается основной конденсатор, вызывая мощный световой импульс, которым обеспечивается перевод рубина в возбужденное состояние. Для получения повторной вспышки необходимо снова зарядить конденсаторы.

Конструкции излучающих головок разнообразны и определяются, прежде всего, размерами рубинового стержня и импульсных ламп. На рис. 2.11 показан внешний вид и схематическое устройство излучающей головки, изготовленной итальянским Высшим институтом связи [36]. В качестве источника возбуждения используется импульсная спиральная лампа типа EF-524. Лампа смонтирована вместе с держателем. Снаружи к держателю привинчен латунный цилиндр с посеребренной внутренней поверхностью. В основании цилиндра имеется центральное отверстие, в которое ввинчивается держатель рубина и два боковых вспомогательных отверстия: одно — смотровое с отвинчивающейся пробкой, а другое для подвода охлаждающего газа (азота). Азот выводится через отверстие в цоколе ламподержателя. Через лампу разряжаются четыре конденсатора емкостью по 100 мкФ каждый, предварительно заряженные до напряжения 4000 в. Схема питания и управления генератора аналогична рассмотренной ранее.

Другой широко известный вариант оптического квантового генератора на рубине имеет несколько улучшенную конструкцию излучающей головки [1, 31]. Этот генератор состоит из тех же основных блоков: блока питания, блока запуска и излучающей головки. Конструктивно первые два блока идентичны рассмотренным ранее, а излучающая головка отличается тем, что она имеет более целесообразно выполненный рефлектор. Этот рефлектор выполнен в виде эллиптического цилиндра, по одной фокальной оси которого расположена импульсная лампа цилиндрического типа, в другой — рубиновый стержень. Такое конструктивное выполнение

излучающей головки позволяет весь световой поток лампы-вспышки пропустить через рубиновый стержень. В этом случае пороговая энергия возбуждения меньше по величине, чем это требуется для первого случая выполнения излучающей головки. Однако изготовление эллиптического отражателя отличается известной сложностью [80].

Расчеты показали, что для возбуждения рубинового стержня диаметром 5 мм и длиной 5 см требуется энергия всего около 5 дж. Следовательно, если учесть потери

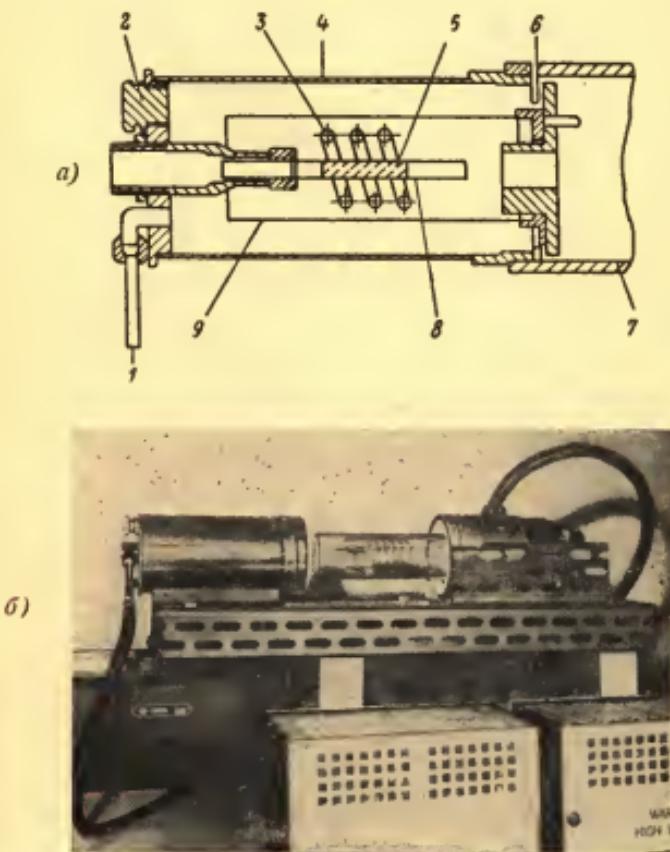


Рис. 2.11. Излучающая головка, изготовленная итальянским Высшим институтом связи.

а — схематическое изображение устройства, б — конструктивное выполнение. 1 — вход для азота, 2 — пробка для контроля, 3 — спиральная импульсная лампа, 4 — цилиндрический рефлектор, 5 — рубин, 6 — выход азота, 7 — держатель, 8 — кварцевая трубка, 9 — стеклянный цилиндр.

энергии при возбуждении, к. п. д. преобразования в лампе-вспышке электрической энергии в световую, ширину спектра излучения лампы и ширину спектральных линий поглощения рубина, то необходимая для генерации энергия составляет около 120 дж [38].

Чтобы выявить вариант, при котором потребляется минимальная энергия, было предложено несколько вариантов расположения рубинового стержня и ламп-вспышек.

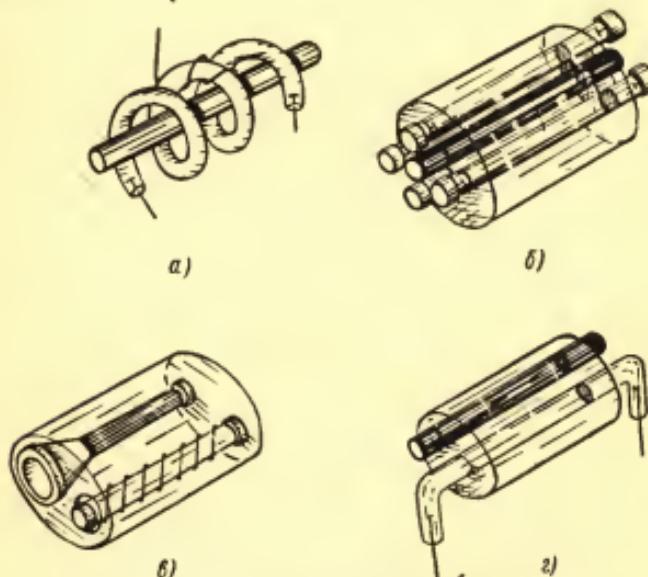


Рис. 2.12. Схема взаимного расположения рубинового стержня и ламп-вспышек:

*а* — спиральная лампа охватывает рубиновый стержень, *б* — четыре лампы цилиндрического типа и рубиновый стержень параллельны друг другу и заключены в цилиндрический рефлектор, *в* — лампа цилиндрического типа и рубиновый стержень размещены по фокальным линиям цилиндро-эллиптического рефлектора, *г* — лампа П-образного типа и рубиновый стержень размещены внутри цилиндрического рефлектора.

На рис. 2.12 приводятся схемы возможного расположения стержня и ламп-вспышек. Однако все эти варианты требуют для генерации энергию от 500 до 2 000 дж. Был опробован также вариант, когда импульсная лампа цилиндрического типа располагалась на расстоянии всего 1 мм от рубинового стержня. Лампа и стержень были обернуты слоем алюминиевой фольги. Такая конструкция требовала для достижения порогового значения возбуждения входной энергии всего 200 дж.

Таблица 2.5

Характеристика	Тип генератора				LHM1
	LH2U	LH2C	LH3	LHM1	
Излучаемая энергия, джс	1,0	1,0—3,0 (с охлаждением)	7—20 (с охлаждением)	50—60	
Потребляемая энергия, джс	500	500	2 000	2 000	
Размер рубинового стержня	$l = 8,25 \text{ см}$ , $d = 0,635 \text{ см}$ с диэлектрическим покрытием	$l = 8,25 \text{ см}$ , $d = 0,635 \text{ см}$ с диэлектрическим покрытием	$l = 16,8 \text{ см}$ , $d = 0,95 \text{ см}$ , с диэлектрическим покрытием	$l = 16,8 \text{ см}$	$d = 1,27 \text{ см}$
Тип рефлектора	Цилиндрический с посеребренной полированной поверхностью	Цилиндрический с посеребренной полированной поверхностью	Ксеноновая лампа-вспышка LFT-4	Четырехэллиптический цилиндр с общей фокусной осью	Четыре лампы-вспышки $l = 15,2 \text{ см}$ , отдаваемая энергия 2 000 джс
Источник возбуждения	Ксеноновая лампа-вспышка LFT-4 $l = 7,6 \text{ см}$ , отдаваемая энергия 800 джс				2 000 джс
Источник питания	LPS-1 до 800 джс $20,3 \times 12,7 \times 18,4$	LPS-1 до 800 джс $20,3 \times 12,7 \times 18,4$	LPS-2 до 2 000 джс $22,8 \times 15,2 \times 27,9$	—	—
Размеры излучающей головки, см	5	5	6	—	—
Вес, кг	120×60×50	120×60×50	120×60×50	—	—
Размеры блока питания, см	140	140	190	—	—
Вес, кг					

В других конструктивных вариантах используются несколько ламп-вспышек П-образного типа, расположенных вокруг рубинового стержня так, что их цилиндрическая рабочая часть параллельна оси стержня. В вариантах с двумя и четырьмя П-образными лампами пороговое значение возбуждения достигается при подаче на вход лампы энергии 320 дж; длительности импульсов при этом равны 250 и 200 мсек соответственно.

Конструктивный вариант с 10 лампами позволяет получать низкие пороговые значения энергии возбуждения. Однако в этом случае излучающая головка нуждается в охлаждении [38]. В табл. 2.5 [129] приведены некоторые характеристики оптических генераторов на рубине.

### Конструктивное выполнение газового оптического генератора

Газовый генератор (особенно первые варианты) отличается от генератора на твердом активном веществе несколько более сложной конструкцией, что, в первую очередь, связано с необходимостью создания вакуума в газоразрядной трубке и заполнением ее определенным составом газовой смеси.

Генератор [1, 72] состоит из трех основных узлов (рис. 2.13): излучающей головки 1, вакуумной системы 2 и системы возбуждения 3. Вакуумная система предназначена для создания вакуума в газоразрядной трубке до  $10^{-3}$  мм рт. ст., для приготовления необходимого процентного содержания газовой смеси и для заполнения этой смесью газоразрядной трубы. Вакуумная система состоит из следующих основных элементов: вакуумного насоса, обеспечивающего снижение давления до  $5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст., масляного диффузионного насоса, снижающего давление до  $10^{-4}$  мм рт. ст., баллонов для гелия и неона, смесительной камеры, азотных ловушек и измерительного прибора.

Система возбуждения создает высокочастотное поле, которое вызывает газовый разряд в трубке. Она состоит из высокочастотного генератора, коаксиального кабеля и внешних электродов, установленных на газоразрядной трубке. Излучающая головка предназначена для создания когерентного направленного монохроматического излучения. Она состоит из газоразрядной трубы,

отражательных зеркал, юстировочного приспособления и сильфонов.

Подготовительные операции по запуску газового генератора заключаются в следующем. Выполняется оптическая юстировка излучающей головки с помощью юстировочного приспособления (рис. 2.14), в процессе

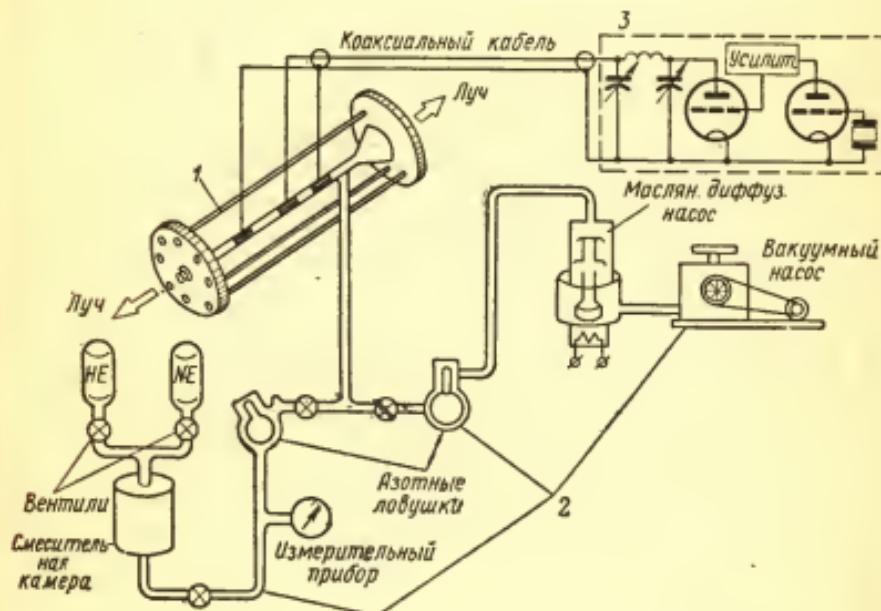


Рис. 2.13. Устройство ОКГ из смеси гелия и неона:  
1 — излучающая головка, 2 — вакуумная система, 3 — ВЧ генератор.

которой одно зеркало устанавливают параллельно другому с точностью 3—5 угл. сек. При этом сначала одно из зеркал устанавливается перпендикулярно газоразрядной трубке, а затем второе зеркало с помощью автоколлиматора — параллельно первому. Отклонение одного и другого зеркала в двух плоскостях обеспечивается с помощью регулировочных микрометрических винтов.

Вторая операция состоит в приготовлении газовой смеси в требуемом процентном соотношении. Обычно смесительная камера наполняется гелием и неоном в соотношении 10:1, затем газоразрядная трубка откачивается до давления  $0,5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст., после чего она

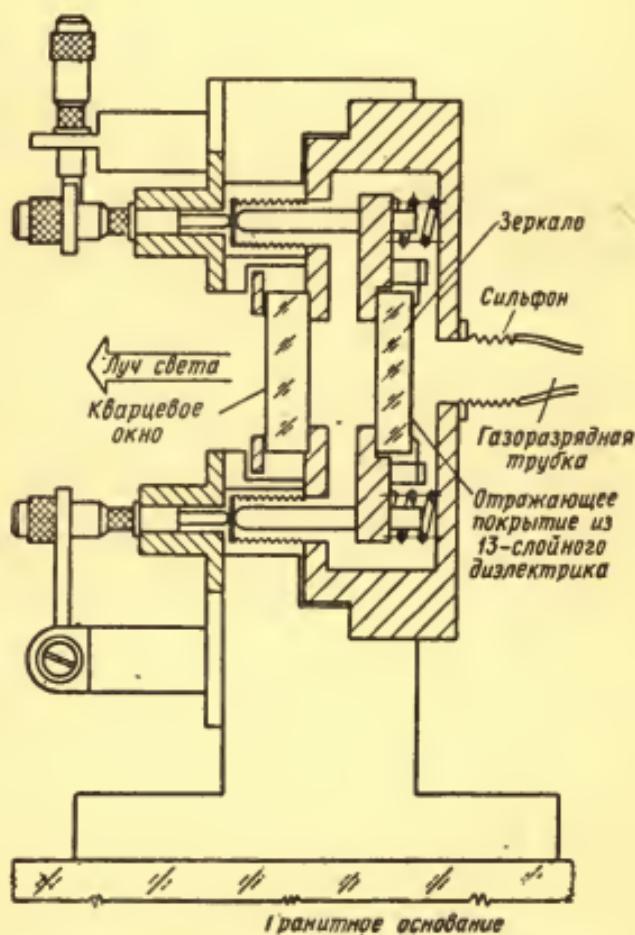


Рис. 2.14. Устройство юстировочного приспособления головки газового генератора.

заполняется приготовленной смесью так, чтобы давление в ней составляло 1 мм рт. ст.

После этого включается высокочастотный генератор и возникает газовый разряд, приводящий к резонансному излучению. Поскольку излучение непрерывно, можно производить дополнительную юстировку зеркал по максимуму излучения на работающем генераторе. Внеш-

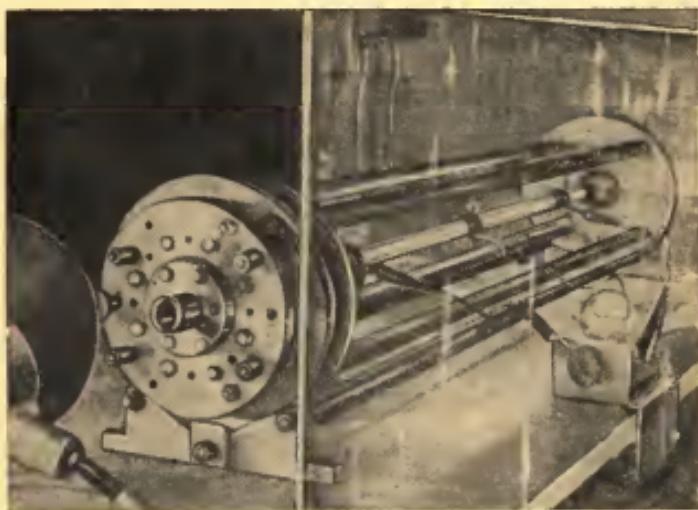


Рис. 2.15. Внешний вид газоразрядной трубки.

ний вид газоразрядной трубы приведен на рис. 2.15.

Размер газоразрядной трубы довольно велик и превышает один метр, поэтому усилия конструкторов были направлены на уменьшение размеров излучающей головки. Были созданы образцы газовых генераторов и небольших размеров: длина излучающей головки составляла 30 и даже 20 см. Уменьшение размеров головки не повлияло на стабильность работы газового оптического генератора [128]. Кроме того, излучающую головку после получения устойчивой генерации стали отпаивать от вакуумной системы, что значительно уменьшило габариты газовых генераторов. По последним сообщениям, создан газовый генератор на смеси гелия и неона, размеры которого составляют 5 см, а выходная мощность излучения — 0,25 мвт [127].

Характерной особенностью газового генератора, использующего в качестве активного вещества пары цезия, заключается в том, что возбуждение газового разряда производится не высокочастотным, а оптическим излучением гелиевой лампы [37, 39]. Для фокусировки излучения на газоразрядной трубке с парами цезия используются два цилиндро-параболических рефлектора (рис. 2.16). Цезий в газообразном состоянии, поддерживаемый при температуре 475° К, обеспечивающей требуе-

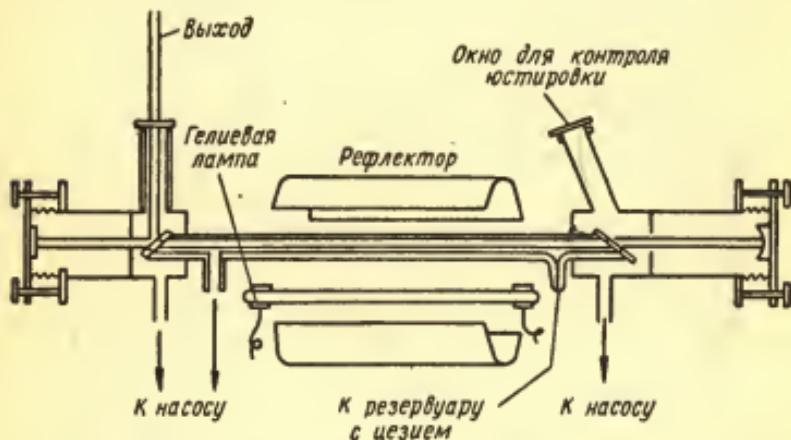


Рис. 2.16. Конструктивное выполнение ОКГ на цезии.

мое давление, подается в трубку с регулируемым подогревом. Отработанный цезий удаляется насосом.

Объемный резонатор составляют два зеркала, которые можно юстировать друг относительно друга. На концах объемного резонатора расположены окна из фтористого бария — материала, прозрачного для ИК излучения. Через одно из окон проходит излучение, создаваемое генератором, другое служит для контроля юстировки.

Прибор дает излучение, обладающее чрезвычайной когерентностью. Ориентировочная ширина спектральной линии составляет 0,003 гц, ширина луча 2 мрад. Длина волны излучения 7,18  $\mu\text{м}$ , однако прибор может излучать и на длине волны 3,2  $\mu\text{м}$  [73, 74].

Основные технические характеристики оптических квантовых генераторов на твердом теле и газовых компонентах приведены в табл. 2.6 и 2.7 [132, 131].

Таблица 26

Материал налаучателя и привесов	Форма и размер активного вещества, $\text{мм}$	Излучающая магнитная волны, $\text{мк}$	Полоса поглощения, $\text{мк}$	Длительность импульса, $\text{сек}$	Погородовая энергия возбуждения, $\text{дж}$	Излучаемая мощность, $\text{амп}$	Рабочая температура, $^{\circ}\text{К}$	Расходомостьлуча, $\text{рад/с}$
Синтетический рубин + хром 0,05%	Куб $10 \times 10 \times 10$	0,6943	0,5—0,6	$10^{-3}$	2 000	$10^7$	300	0,016
Синтетический рубин с сапфировым покрытием + хром 0,05%	Цилиндр $5 \times 37$	0,6943	—	Непрерывная	80	0,01	77	0,01
Синтетический рубин (с яч. Керра)	Цилиндр $11,2 \times 63,5$	0,6943	0,5—0,6	$10^{-6}$	1 000—2 000	$10^8$	300	—
Фтористый кальций + уран	Цилиндр $20 \times 150$	2,5	0,9	Непрерывная	1—2	0,1	100	—
Вольфрамат кальция + неодимий	—	1,6	0,57—0,6	Непрерывная	14	0,5—1,0	77	—
Стекло (с оптическим затвором)	Цилиндр $6,3 \times 450$	1,95	0,44—0,46	$10^{-7}$	—	$2 \cdot 10^8$	77	0,033
Фтористый кальций (с солнечным возбуждением)	Цилиндр $5 \times 30$	2,36	0,8—1,0	Непрерывная	50	1,0	—	—
Пластмасса + европий*	Волокно $1 \times 500$	0,6130	0,340	$2,5 \cdot 10^{-4}$	—	—	77	—

\* Конфигурация активного вещества — от плоских листов до катушки.

Таблица 2.7

Газовые компоненты	Излучаемая длина волны, мк	Пороговая мощность возбуждения, вт	Источник возбуждения	Излучаемая мощность, мвт	Рабочая температура, К	Спектральная частота, кгц	Расходимость луча, ради
Гелий + неон	1,1—1,2	50 28	ВЧ поле	10	300	1—10	$10^{-4}$
Гелий + неон	2,39	50 28	ВЧ поле	10	300	10	$10^{-4}$
Гелий + неон	0,6328	—	Постоянный ток	3	300	—	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Аргон + кислород	0,8446	—	—	1	300	—	—
Пары калия	0,7700	—	—	1	435	—	—
Благородные газы	1,618—2,189	—	Постоянный ток	0,5—3,0	300	—	—
Пары цезия	7,180	—	Оптическое излучение	1	445	$10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$

## Полупроводниковый оптический генератор

Предпосылкой к появлению полупроводниковых оптических генераторов было исследование некогерентного излучения полупроводниковых диодов, конструктивное выполнение одного из которых приведено на рис. 2.17. Диод из арсенида галлия прикреплен на молибденовом лепестке, покрытом сплавом золота и олова. Длина лепестка составляет всего 1 мм. К лепестку подводится электрический ток, который при протекании через *p-n* переход приводит к излучению фотонов света. Первые исследования показали, что это излучение некогерентно и довольно широко по спектру. С увеличением тока начинает возрастать интенсивность светового потока, а ширина линии излучения (при достижении плотности тока порядка  $10\,000\text{ a/cm}^2$ ) сужается со 100 до  $5\text{ \AA}$ .

Однако для получения когерентного излучения полупроводникового диода только увеличения плотности тока недостаточно. Кроме того, на двух противоположных и строго параллельных сторонах диода (стороны перпендикулярны *p-n* переходу) необходимо создать отражающие зеркала. Конструктивно это выполняется путем полировки двух противоположных сторон кристалла. В результате этого граница между кристаллом и воздухом приобретает свойства отражающей поверхности. Остальные стороны кристалла подвергают химическому травлению. Такая обработка диода позволила получить когерентное монохроматическое излучение с малым угловым раствором луча.

Измерение спектрального состава излучения показало, что его максимум лежит в области  $8400\text{ \AA}$ . Спектральная характеристика одного из диодов приведена на рис. 2.17,б.

Оптический генератор на арсениде галлия [92, 93], изготовленный в виде параллелепипеда со сторонами  $0,1 \times 0,1 \times 1,25\text{ mm}^3$ , обладает следующими характеристиками:

- плотность тока, необходимая для генерации когерентного излучения  $10^4\text{—}10^6\text{ a/cm}^2$ ;

- пороговое значение тока, протекающего через прибор,  $8,13a$ ;

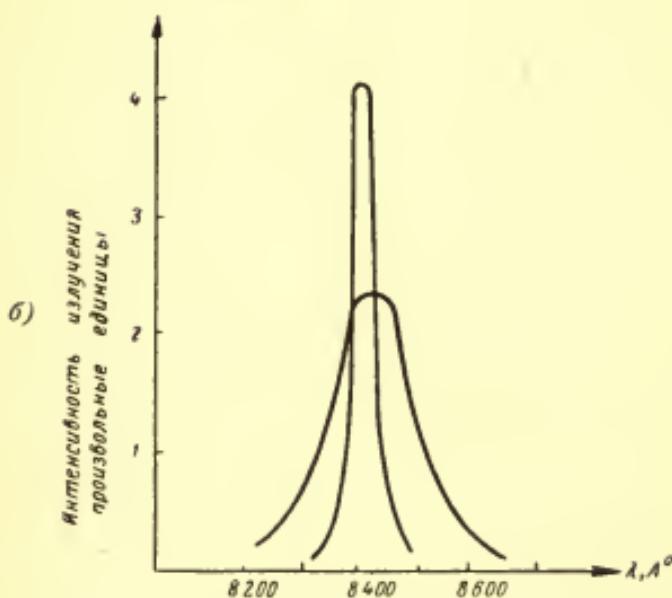
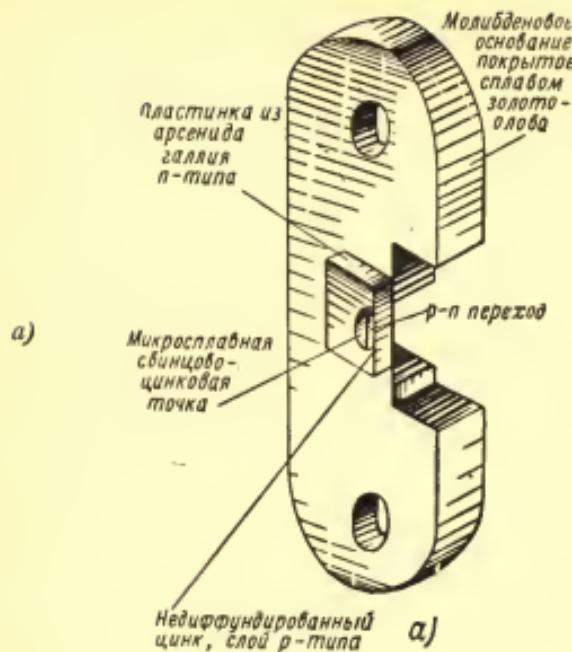


Рис. 2.17. Полупроводниковый оптический квантовый генератор:

а — конструктивное выполнение излучающего элемента,  
б — спектральная характеристика излучения.

— длительность импульса 50 нсек;

— ширина линии излучения 0,5 Å.

В литературе [95] указывается, что этот прибор может работать и при комнатной температуре. Было получено непрерывное излучение от генератора на арсениде галлия; выходная мощность составляет 10—25 мвт при мощности возбуждения 50 мвт, максимум излучения находится на участке спектра 8400 Å, рабочее вещество охлаждается жидким азотом [95, 96].

В качестве активного вещества для полупроводниковых оптических генераторов могут использоваться арсенид галлия, кремний с примесью индия, фосфид галлия, арсенид индия, арсенид-фосфид галлия [97, 98, 99].

Основными преимуществами оптического генератора на полупроводниковых материалах являются: высокий к. п. д., доходящий до 80—90% (правда при небольших выходных мощностях), более простой метод возбуждения активного вещества, простота модуляции путем воздействия на ток возбуждения и простота конструкции [101, 102]. Однако излучаемая мощность полупроводниковых генераторов пока не превосходит 0,5—1 вт.

В табл. 2.8 приведены некоторые характеристики полупроводниковых генераторов.

Таблица 2

Активное вещество	Излучаемая длина волны, мк	Режим работы	Рабочая температура, °К
Арсенид галлия	0,84	Импульсный и непрерывный	320
Фосфид индия	0,91	Импульсный и непрерывный	104
Арсенид индия	3,1	Импульсный и непрерывный	147
Арсенид—фосфид галлия	0,61—0,84	Импульсный	47
			104
			31
			125

Из табл. 2.8 видно, что от полупроводникового генератора, изготовленного на основе трехкомпонентной смеси галлия, мышьяка и фосфора, в зависимости от количества мышьяка и фосфора может быть получено излучение в диапазоне от 0,61 до 0,84 мк. Имеется предположение, что может быть получено излучение и в диапазоне от 0,84 до 3,1 мк [131].

## Квантовый генератор непрерывного излучения на твердом теле

В связи с тем, что непрерывно излучающие газовые генераторы имеют незначительную выходную мощность, проводятся интенсивные исследования по созданию непрерывно излучающих генераторов на твердом теле. Для экспериментов используют рубиновые стержни [47, 103], вольфрамат кальция с примесью неодимия [48, 104, 105], рубиновые стержни с сапфировыми приставками [106], фтористый кальций [107, 9, 10], а также стекло [108].

В квантовых генераторах, работающих в непрерывном режиме, применяют рубиновые стержни, которые имеют на одном конце расширяющийся конус из бесцветного сапфира. На основание этого конуса с помощью системы зеркал фокусируется свет ртутной лампы высокого давления. Сам кристалл охлаждается до температуры жидкого азота. Пороговая мощность, необходимая для возбуждения кристалла, составляет 850 вт, излучаемая мощность—примерно 1 мвт.

В другом приборе в качестве активного вещества используется вольфрамат кальция с примесью трехвалентного неодимия. Это вещество имеет низкий порог возбуждения. Кристаллу придают форму стержня, торцы которого используются для создания сферического объемного резонатора. Стержень и ртутная лампа цилиндрического типа укреплены в фокальных линиях цилиндро-эллиптического отражателя.

Конструкция этого прибора довольно сложная (рис. 2.18). Поскольку основным препятствием для работы генератора в непрерывном режиме является перегрев кристалла и источника возбуждения, предприняты меры, защищающие их от перегрева. В конструкции предусмотрено охлаждение кристалла жидким кислородом одновременно с применением жидкого фильтра, поглощающего инфракрасное и ультрафиолетовое излучение источника возбуждения. Кроме того, источник возбуждения и рефлектор имеют систему водяного охлаждения.

Потребляя для возбуждения мощность около 900 вт, генератор, работая в непрерывном режиме в течение 20 мин, развивал мощность 2—3 вт, излучая на волне

1,063 мк. Генератор может работать и более продолжительное время, а излучаемая мощность может быть повышена в 10 раз. Кроме того, при улучшении качества кристалла прибор может работать в непрерывном ре-

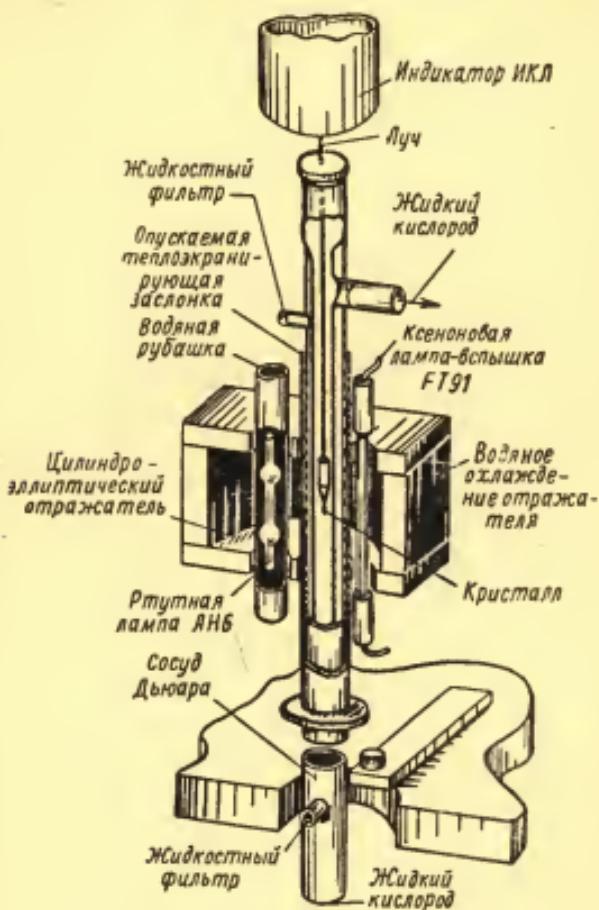


Рис. 2.18. Квантовый генератор непрерывного излучения на твердом теле.

жиме без специального охлаждения при комнатной температуре кристалла.

Были проведены также эксперименты по получению непрерывного излучения от фтористого кальция с примесью диспрозия. Для получения двухвалентного диспрозия кристаллы фтористого кальция с трехвалентным диспрозием были подвергнуты облучению  $\gamma$ -лучами.

Кристалл охлаждался до температуры жидкого азота. Для возбуждения использовалась солнечная энергия, собираемая на кристалле полусферическим зеркалом диаметром 30 см [109, 110]. При мощности возбуждения около 50 вт была получена выходная мощность 1 вт. Этот же генератор работал в непрерывном режиме от лампы накаливания мощностью 40 вт.

Одним из путей, по которому идет разработка генераторов большой мощности, является использование

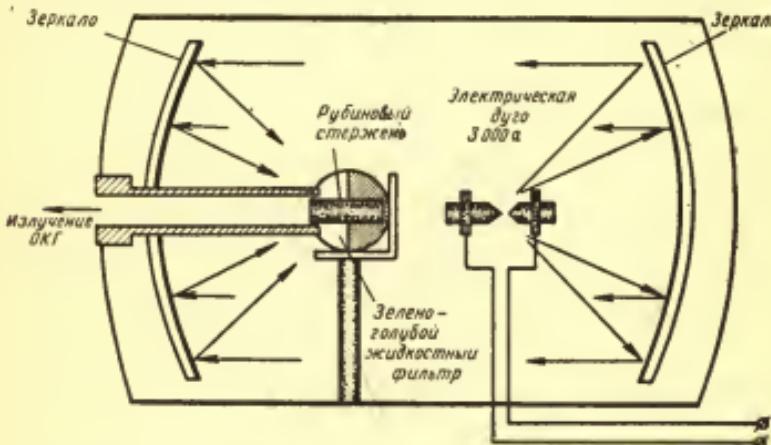


Рис. 2.19. Поперечный разрез дуговой отражательной печи, используемой в качестве мощного источника возбуждения.

мощных источников возбуждения. Эти источники различны по своему конструктивному выполнению, но все они предназначены для облучения активного вещества возможно большим количеством энергии. На рис. 2.19 показан схематичный поперечный разрез дуговой отражательной печи, которая использовалась для создания высокой энергетической плотности возбуждающего потока на рубине. В экспериментах использовали дуговую печь мощностью 500 квт, наполненную газом под давлением [103].

Световой поток от электрической дуги с помощью двух зеркал фокусировался на цилиндрической поверхности рубинового стержня. Кристалл рубина монтировался в центре сферической полости из пирекса, наполненной медным раствором. Эта полость предназначалась для поглощения видимого инфракрасного и ультрафиолетового света и пропускания света с длиной

волны 4 500—5 000 Å. Кроме того, она улучшала оптическую связь потока, падающего наклонно на сферу с поверхностью рубинового стержня и способствовала охлаждению рубина и его полностью посеребренного внутреннего конца. Таким образом, в фокальной плоскости печи обеспечивалась концентрация светового излучения сине-зеленой части спектра с объемной плотностью мощности  $2750 \text{ вт/см}^2$ . С помощью этого устройства было получено непрерывное возбуждение рубина.

Длительность воздействия мощным потоком возбуждения на рубиновый стержень была различной и колебалась в пределах 0,2—1,2 сек. При более длительном воздействии кристалл разрушался. Излучение наблюдалось на волнах 0,6943 и 0,6929 мк при соотношении интенсивностей 2 : 1.

Для увеличения к. п. д. и предотвращения разрушения кристалла рубина от перегрева использовалось криогенное охлаждение жидким азотом. Экспериментально обнаружено, что кристаллы небольших размеров выдерживают большие плотности возбуждающего потока, чем крупные кристаллы, что объясняется тем, что мелкие кристаллы более равномерно облучаются и имеют меньшие тепловые градиенты.

### Некоторые последние разработки оптических квантовых генераторов

*Импульсные газовые оптические квантовые генераторы.* В Англии было получено стимулированное излучение от смеси гелия с окисью углерода при возбуждении энергией радиочастотного участка спектра или разрядом постоянного тока. Газоразрядная трубка возбуждалась мощным магнетроном 10-см диапазона либо импульсами постоянного тока длительностью 10 мксек, протекающего через вольфрамовые электроды, впаянные в боковые отростки разрядной трубки. Частота следования импульсов не превышала 1 кгц. Мощность излучения достигала максимума (1 вт) через 30—60 мксек после окончания возбуждающего импульса, длительность импульса генерации при половинной мощности составляла 40—50 мксек. При возбуждении импульсами 10-см диапазона была получена мощность 0,5 вт на длине волны 1,153 мк. Излучение возникало сразу же

после импульса изображения. Длительность импульса генерации при половинной мощности в этом случае составляла 30 мксек [112].

*Сверхмощный оптический квантовый генератор.* Разработан рубиновый генератор, обеспечивающий в импульсе энергию 500 дж. В середине 1963 г. появились генераторы с энергией в импульсе 1500 дж [83]. В качестве

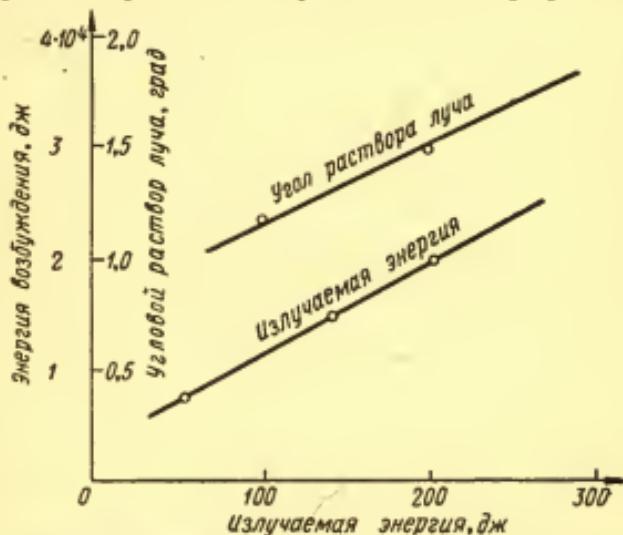


Рис. 2.20. Зависимость углового раствора луча и излучаемой энергии от энергии возбуждения.

активного вещества используется стержень больших размеров (его длина 168 мм, диаметр 16 мм). Стержень размещается в полиэллиптическом рефлекторе с четырьмя лампами цилиндрического типа и охлаждается жидким азотом. Общая энергия, отдаваемая лампами, составляет 40 000 дж. К. п. д. генератора — около 1%.

Зависимость углового раствора луча и излучаемой энергии от энергии возбуждения приведена на рис. 2.20. Несмотря на значительную излучаемую энергию, угловой раствор луча продолжает оставаться достаточно узким. При излучаемой энергии 350 дж угловой раствор луча составлял 2° [113].

*Генератор с совмещенным активным веществом и источником возбуждения.* Одним из примеров существенной модернизации конструкции генератора на твердом теле является генератор с возбуждением световой

энергией газового разряда, происходящего внутри активного вещества [114, 115]. В этой конструкции активное вещество (кристалл или активированное стекло) служит оболочкой лампы-вспышки и изготавливается в виде цилиндрического стержня, внутренняя полость которого заполняется смесью ксенона и аргона, разряд в которой обеспечивает возбуждение активного вещества. Внешняя поверхность активного вещества для уменьшения потерь энергии покрывается диэлектриком [28]. Такие генераторы имеют более низкий порог возбуждения. Так, например, генератор на фтористом барии с примесью самария при 40° К начал излучать при плотности мощности возбуждения 10  $vt/cm^2$  (вдвое меньше, чем при обычных методах возбуждения), а стекло с примесью неодимия при комнатной температуре излучало при плотности мощности возбуждения 1  $vt/cm^2$  (в пять раз меньше, чем при других способах возбуждения).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Electronics, 1961, v. 34, № 43, p. 39—47; v. 34, № 44, p. 40—44; v. 34, № 45, p. 81—85; v. 34, № 47, p. 54—57.
2. Applied Optics, 1962, v. 1, № 2, p. A-27.
3. J. Applied Phys., 1961, v. 32, № 739.
4. Missiles and Rockets, 1961, 13/II, v. 8, № 7, p. 38—39.
5. Aviation Week, 1961, 6/II, v. 74, № 6, p. 34.
6. Scientific American, 1963, VII, № 1, p. 34—35.
7. Electrical Design News, 1962, XII, № 14, p. 40—43.
8. Aviation Week, 1962, 26/XI, № 22, p. 73.
9. Electronic Design, 1962, 6/XII, № 25, p. 33.
10. New Scientist, 1962, 27/XII, № 319, p. 724.
11. Missiles and Rockets, 1962, № 19, p. 35.
12. Electronic News, 1962, v. 7, № 322, p. 4.
13. Electronics, 1962, 9/XI, № 35, p. 7.
14. Electronic Design, 1962, 8/XI, № 23, p. 24.
15. Electronic News, 1962, v. 7, № 323, p. 51.
16. Aviation Week, 1962, 10/XII, № 24, p. 103.
17. Electronics, 1962, 17/VIII, № 33, p. 28.
18. Aviation Week, 1963, 6/V, № 18, p. 92, 95.
19. Science News Letter, 1962, 18/VIII, № 7, p. 103.
20. Electronics, 1961, № 43, p. 39.
21. Radio and Electron Comp., 1962, III, № 9.
22. Missiles and Rockets, 1962, 10/XII, № 24, p. 25.
23. Principles of Optics. New York, 1959, p. 322.
24. Applied Optics, 1962, v. 1, № 2, p. 173—179.
25. RCA Review, 1961, IX, v. 22, № 3, p. 359—469.
26. Electronic Design, 1962, 22/XI, № 24, p. 137.
27. Материалы фирмы EGG, вып. 5110.
28. Aviation Week, 1962, 19/XI, № 21, p. 89.
29. J. de physique et le radium, 1961, t. 22, № 12, p. 832—834.

30. Applied Optics, 1962, III, № 1, p. 169.
31. Шавлов А., Фогель С., Дальберджер Л. Оптические квантовые генераторы. Пер. с англ. Изд-во иностранной литературы. 1962.
32. Electronics, 1962, 19/X, № 42, p. 7, 8.
33. Electronic Design, 1962, 13/IX, v. 10, № 19, p. 130.
34. Interavia Air Letter, 1963, 13/IX, № 5328, p. 6.
35. Electronic Design, 1962, 15/II, v. 10, № 4, p. 86—89.
36. Alta Frequenza, 1962, 1X, v. 31, № 9, p. 560—565.
37. Electronic News, 1962, v. 7, IV, № 314, p. 1.
38. J. Appl. Phys., 1961, IV, v. 32, № 4, p. 740—741.
39. Electronics, 1962, 27/IV, v. 35, № 17, p. 23.
40. U. S. Government Research Report, 1962, 5/VI, № 21, p. 40.
41. Aviation Week, 1962, 26/XI, № 22, p. 73.
42. J. Opt. Soc. America, 1962, XI, № 12, p. 6.
43. Applied Optics, 1962, VI, № 1, p. 11—15.
44. Advances of Quantum Electronics, 1961, New York and London, p. 79—82.
45. Rev. Sci. Instruments, 1962, III, v. 33, № 3, p. 372—375.
46. Electronic Design, 1962, II, v. 10, № 4, p. 90—93.
47. Bell. Labs. Rec., 1962, III, v. 40, № 3, p. 104—105.
48. Bell. Labs. Rec., 1962, II, v. 40, № 2, p. 63—64.
49. Electronics, 1962, III, v. 35, № 11, p. 85.
50. Electronics, 1962, v. 35, № 23, p. 8.
51. Electronic News, 1962, 9/IV, № 313, p. 46.
52. Aviation Week, 1962, 17/XI, v. 77, № 25, p. 71.
53. Missiles and Rockets, 1963, 21/I, v. 12, № 3, p. 22.
54. Electronics, 1962, 28/XI, v. 35, № 52, p. 7—8.
55. Bell. Labs. Rec., 1961, XI, v. 39, № 11, p. 395.
56. J. Appl. Phys., 1962, v. 33, № 11, p. 3194—3195.
57. Electronic News, 1962, 25/VI, № 324, p. 1.
58. Electronic Design, 1962, 16/VIII, № 17, p. 13.
59. Electronic Design, 1962, 13/IX, № 336, p. 41.
60. Aviation Week, 1962, 23/VII, № 4, p. 59.
61. Electronics, 1962, 31/VII, № 35, p. 25.
62. J. Appl. Phys., 1962, v. 33, № 2, p. 743—744.
63. Electronic Design, 1962, 12/IV, v. 10, № 8, p. 19.
64. Proc. IRE, 1962, VIII, v. 50, № 8, p. 1833.
65. Signal, 1962, VII, № 11, p. 27.
66. Electronics Weekly, 1962, № 90, p. 2.
67. Electronic News, 1962, v. 7, V, № 318, p. 1.
68. Proc. IRE, 1962, v. 50, № 7, p. 1703—1704.
69. Electronic Design, 1962, 6/XII, v. 10, № 25, p. 96—97.
70. Electronics, 1962, 16/XI, v. 35, № 46, p. 24—25.
71. Len d u e l A. Lasers. New York, 1962.
72. Proc. IRE Austr., 1962, III, v. 23, № 3, p. 171—177.
73. Applied Optics, 1962, v. 1, № 4, p. 513—514.
74. Electronic News, 1962, 16/V, № 314, p. 1, 4.
75. Applied Optics, 1962, v. 1, № 2, p. A-27.
76. Proc. IRE, 1962, v. 50, № 6, p. 1543—1544.
77. Electronics, 1961, v. 34, № 4, p. 69.
78. Phys. Rev. Letter, 1961, v. 6, № 3, p. 106—140.
79. Missiles and Rockets, 1961, 10/IV, № 45, p. 21.
80. Proc. IRE, 1961, v. 49, № 5, p. 960—961.

81. Electronic News, 1961, XII, v. 6, № 295, p. 22.  
 82. Proc. IRE, 1962, v. 50, № 12, p. 2488—2489.  
 83. Missiles and Rockets, 1963, 8/VII, № 2, p. 123.  
 84. Electronic News, 1963, v. 8, № 364, p. 30.  
 85. Electronics, 1963, v. 36, № 10, p. 7.  
 86. The Wall Street Journal, 1963, 8/III, № 47, p. 12.  
 87. Electronics, 1963, v. 36, № 7, p. 74, 76, 78.  
 88. Electronic Design, 1962, v. 10, № 21, p. 30—31.  
 89. IBM J. Res. and Development, 1963, v. 7, № 1, p. 62—63.  
 90. Proc. IEEE, 1963, v. 51, № 3, p. 471—472.  
 91. Z. Phys., 1963, J. 173, № 2, S. 241—260.  
 92. Electronic Design, 1962, 22/XI, v. 10, № 24, p. 4—6.  
 93. Electronic News, 5/XI, v. 7, № 345, p. 1, 5.  
 94. Electronics, 1962, 9/XI, v. 35, № 45, p. 7.  
 95. Electronics, 1962, 16/XI, v. 35, № 46, p. 7.  
 96. Electronic Design, 1962, 6/XII, v. 10, № 25, p. 16—17.  
 97. Electronic Design, 1962, 13/IX, № 19, p. 32—38.  
 98. Electronics, 1962, 30/VII, № 35, p. 25.  
 99. Electronics, 1962, 28/XII, v. 35, № 52, p. 7, 8.  
 100. Electronics, 1962, 16/X, v. 35, № 46, p. 24—25.  
 101. Electronic News, 1962, 19/X, v. 8, № 347, p. 27.  
 102. Proc. IRE, 1962, v. 50, № 3, p. 816.  
 103. Electronics, 1962, v. 35, № 2, p. 26—27.  
 104. Proc. IRE, 1962, v. 50, № 2, p. 213.  
 105. Applied Optics, 1962, v. 1, № 2, p. 181—183.  
 106. Proc. IRE, 1962, v. 50, № 7, p. 1691—1692.  
 107. Electronics, 1962, 9/XI, № 45, p. 7.  
 108. Electronic Design, 1962, 6/XII, № 25, p. 33.  
 109. New Scientist, 1962, 27/XII, № 319, p. 724.  
 110. Electronic Design, 1962, 12/IV, v. 10, № 8, p. 16—18.  
 111. Nature, 1963, v. 197, № 4863, p. 173—174.  
 112. Electronic News, 1963, 14/II, v. 8, № 355, p. 30.  
 113. Aviation Week, 1962, 19/XI, № 21, p. 89.  
 114. Electronic Design, 1962, 22/XI, № 24, p. 32.  
 115. Interavia Air Letter, 1963, 13/III, № 5201, p. 10.  
 116. Electronic News, 1963, 18/II, № 360, p. 1, 12.  
 117. Electronics, 1963, 15/II, v. 36, № 7, p. 7.  
 118. Interavia Air Letter, 1963, 18/II, № 5184, p. 4.  
 119. Electronic Design, 1963, 1/III, № 5, p. 11.  
 120. Electronics, 1964, 24/I, № 4, p. 19.  
 121. Electronic News, 1963, 11/II, № 359, p. 20.  
 122. Electronic Design, 1962, v. 10, № 21, p. 30, 31.  
 123. Electronics, 1962, 9/XI, v. 35, № 45, p. 7.  
 124. Phys. Rev., 1962, 1/IX, v. 127, № 5, p. 1559—1563.  
 125. Appl. Phys. Letter, 1962, 1/XII, VI, № 4, p. 89—90.  
 126. Proc. IRE, 1962, VIII, v. 50, № 9, p. 1822—1823.  
 127. British Communication and Electronics, 1964, 11, № 2, p. 122.  
 128. Elektron. Rundschau, 1963, Bd. 17, № 4, S. 185—186.  
 129. Microwave J., 1962, № 10, вкладка, p. 49—53.  
 130. Missiles and Rockets, 1963, 8/XII, № 2, p. 23.  
 131. Scientific American, 1963, July, v. 209, № 1, p. 34—35.  
 132. Space Aeronautic Research and Development Technical Handbook, 1962—1963, p. E13.  
 133. Applied Phys. Letters, 1963, v. 3, № 3, p. 36—40.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

### МОДУЛЯЦИЯ, ПРИЕМ И УПРАВЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

#### 1. МОДУЛЯЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Для модуляции излучения применяют внешний и внутренний методы. Внешний метод состоит в том, что излучение оптического генератора направляется через определенную среду, на которую воздействуют тем или иным способом, в результате чего выходящее из среды излучение оказывается промодулированным.

Внутренний метод состоит в том, что для модуляции излучения используется различное воздействие на активное вещество.

При *внешнем* методе модуляции чаще всего применяют вращение плоскости поляризации излучения. Впервые это явление было обнаружено Фарадеем в результате воздействия на среду, через которую проходит излучение, магнитным полем. Эта среда (парамагнитные кристаллы с высокой концентрацией редкоземельных ионов, не являющихся оптически активным веществом) размещалась между полюсами сильного электромагнита. Излучение вначале пропускается через одну поляризующую призму, которая поляризует излучение источника, затем через среду и затем через вторую поляризующую призму, плоскость поляризации которой перпендикулярна первой. При отсутствии магнитного поля излучение через такое устройство не проходит. При воздействии магнитного поля на среду наблюдается поворот плоскости поляризации. Угол поворота определяется выражением

$$\Theta = kIH, \text{ угл. мин,}$$

где  $H$  — напряженность магнитного поля, эрст;  
 $l$  — длина пути, проходимого светом в среде, см;  
 $k$  — коэффициент пропорциональности.

В зависимости от угла поворота плоскости поляризации изменяется и количество лучистой энергии, выходящей из устройства. Интенсивность лучистого потока, прошедшего через устройство, зависит от угла поворота плоскости поляризации и может быть найдена из выражения

$$J = J_0 \sin^2 \theta.$$

Таким образом, может быть осуществлена амплитудная модуляция лучистого потока. Для большинства исследованных сред величина коэффициента  $k$  лежит в пределах 0,1—0,01, т. е. составляет незначительную величину, поэтому для увеличения угла поворота плоскости поляризации необходимо иметь значительную напряженность магнитного поля и большие размеры среды. Предельные углы поворота плоскости поляризации составляют несколько десятков минут.

Весьма существенным достоинством данного способа модуляции является то, что вращение плоскости поляризации наступает через малый промежуток времени после включения магнитного поля. Время запаздывания составляет  $10^{-9}$  сек. Резонансная частота типовых кристаллов, используемых в качестве сред, равна 1 500 Гц, а полоса пропускания составляет величину несколько мегагерц [26, 27].

Другой способ поворота плоскости поляризации основан на эффекте Керра, который состоит в следующем. Излучение источника, пропущенное через поляризационную призму, направляют на кювету с жидкостью, в которую введены пластины плоского конденсатора, и снова на поляризационную призму. В отсутствие электрического поля жидкость анизотропна и излучение не меняет состояние поляризации. Если к конденсаторам приложить напряжение, то жидкость приобретает свойства одноосного кристалла с осью, направленной вдоль электрического поля. В результате этого возникает двойное лучепреломление. Угол поворота плоскости поляризации определяется выражением

$$\theta = BIE^2,$$

где  $l$  — толщина слоя жидкости, см;

$E$  — напряженность электрического поля, в/см;

$B$  — постоянный коэффициент (постоянная Керра), в электрических единицах, зависящий не только от свойств вещества, но и от квадрата напряженности электрического поля, прикладываемого к плоскому конденсатору.

В зависимости от угла поворота плоскости поляризации меняется величина лучистого потока на выходе устройства.

Этот эффект наблюдается не только в жидкостных, но и в кристаллических активных веществах и даже в более сильной форме, поскольку в этом случае эффект линейно зависит от напряженности электрического поля. Инерционность данного явления также незначительна и составляет  $10^{-9}$  сек. Обычно рабочая частота такого модулятора лежит в диапазоне от 30 до 1000 Мгц при глубине модуляции от 0 до 100%. Возможна модуляция и на частотах до 15 000 Мгц, однако в этом случае глубина модуляции уменьшается [28, 29].

Третий способ поворота плоскости поляризации состоит в воздействии на среду с помощью механических усилий.

Если на среду действовать в одном направлении растягивающими, а в другом сжимающими усилиями, то условия распространения света по различным направлениям оказываются различными и возникает двойное лучепреломление. В этом случае угол поворота плоскости поляризации определится выражением

$$\theta = ckpd,$$

где  $c$  — постоянный коэффициент,  $c = \frac{2\pi k}{\lambda}$ ;

$p$  — давление;

$k$  — постоянная, определяемая свойствами вещества;

$d$  — толщина слоя вещества;

$\lambda$  — длина волны.

Крупным недостатком данного способа модуляции является то, что двойное лучепреломление может сохраняться при снятии деформирующей силы, поскольку в среде могут сохраняться напряжения.

Для *внутренней* модуляции используют воздействие на активное вещество с помощью периодического вклю-

чения возбуждения, импульсную модуляцию уровня возбуждения, воздействие на вещество сильными электрическими, магнитными полями, а также ультразвуковыми колебаниями.

Воздействием на активное вещество периодическим включением источника возбуждения можно получить амплитудную модуляцию излучения со значительной глубиной модуляции только на небольших частотах (1—10  $\text{егц}$ ). При дальнейшем увеличении частоты глубина модуляции падает.

Импульсная модуляция уровня возбуждения состоит в том, что к активному веществу непрерывно подводится энергия возбуждения, но не настолько большой величины, чтобы наступило стимулированное излучение. В этом случае большое количество возбужденных частиц сосредоточивается на верхнем энергетическом уровне и чтобы вызвать стимулированное излучение, достаточно сравнительно слабого импульса возбуждения. Через 100  $\text{микросекунд}$  после выключения возбуждения другой источник подает на активное вещество короткий импульс малой мощности, вызывая стимулированное излучение. Если импульсы от второго источника возбуждения будут следовать с интервалами 100  $\text{микросекунд}$ , то частота повторения импульсов стимулированного излучения составит  $10^4$  имп/сек. При этом флюктуации уровня выходного сигнала будут достаточно малыми.

Этот метод позволяет производить либо фазовую импульсную модуляцию, либо амплитудную импульсную модуляцию.

Воздействие на активное вещество сильным магнитным полем приводит к тому, что это поле возмущает электронные орбиты в атоме. Каждое стационарное состояние, которое раньше характеризовалось определенной энергией, приобретает добавочную энергию, которая (как показал эксперимент Зеемана) ведет к расщеплению\* спектральных линий на несколько компонент.

\* В 1896 г. Зееман обнаружил, что если поместить источник света между полюсами мощного электромагнита, то все линии его спектра как бы уширяются, что вызывается расщеплением каждой линии на несколько компонент.

В спектре излучения атома появляются частоты, соответствующие сумме и разности частоты, вращения электрона вокруг ядра и частоты прецессии, обусловленной влиянием поля.

Компоненты, на которые расщепляется в магнитном поле спектральная линия излучения, поляризованы.

При наблюдении излучения в направлении, перпендикулярном напряженности магнитного поля, видно, что спектральная линия расщепляется на три компонента, поляризованные прямоолинейно: средняя с колебанием электрического вектора вдоль поля напряженности и крайние с колебаниями, перпендикулярными полю напряженности. При наблюдении излучения, распространяющегося вдоль линий напряженности магнитного поля, видно, что средняя компонента пропадает, а крайние имеют круговую поляризацию.

Расщепление спектральных линий под влиянием внешнего магнитного поля определяется выражением

$$\Delta v = k_1 \frac{e}{m} H.$$

Эффект Зеемана в газовых оптических квантовых генераторах на гелий-неоновой смеси был подробно изучен и освещен в литературе [2].

Расщепление спектральных линий под влиянием внешнего электрического поля (явление Штарка) определяется выражением

$$\Delta v = k_1 k_2 \frac{1}{em} E,$$

где  $m$  — квантовое число;

$e$  — заряд электрона;

$k_1, k_2$  — коэффициенты пропорциональности.

Компоненты, как и в случае явления Зеемана, оказываются поляризованными.

Несмотря на такое многообразие методов модуляции, необходимо отметить, что все они имеют существенные недостатки, ограничивающие их применение для модуляции излучения оптического квантового генератора. Так, например, широкополосная модуляция с использованием электрических и магнитных полей может осложнить проблему охлаждения активного вещества генератора, поскольку устройства для создания электрических и магнитных полей должны располагаться рядом с активным веществом. При узкополосной модуляции особых проблем не возникает, но в этом случае

возможности оптического диапазона не используются. Потери при использовании ячеек Фарадея или Керра в широкой полосе частот, а также проблемы охлаждения их приводят к тому, что диапазон частот модуляции ограничивается несколькими мегагерцами.

### Модуляционное устройство, основанное на электрооптическом эффекте

Разработано и успешно испытано модуляционное устройство для систем связи, которое называется «фазовый модулятор бегущей волны для когерентного света» [3, 4]. В основу действия модулятора положен эффект Керра.

Модулятор состоит из двух латунных стержней длиной около 1 м, между которыми помещены в ряд 17 кристаллов первичного кислого фосфата аммония, размером  $2 \times 4 \times 56$  мм каждый. Кристаллы удерживаются на стержнях при помощи неглубоких канавок.

Особенностью конструкции этого модулятора является то, что модулирующее напряжение прикладывается к материалу кристалла с помощью системы длинной линии с бегущей волной. Излучение и модулирующая СВЧ волна распространяются коллинеарно, а длинная линия рассчитана таким образом, чтобы излученная волна, проходящая через кристалл, изменилась синхронно с модулирующим напряжением на линии.

При пиковой мощности модуляции около 12 вт модуляция достигала максимального значения [5]. Фазовый модулятор света значительно отличается от амплитудных модуляторов своими характеристиками. Так, например, амплитудный модулятор работает в полосе порядка 30 Мгц и для модуляции требует мощности порядка нескольких киловатт.

Кроме того, фазовый модулятор сравнительно нечувствителен к внутренним напряжениям, и источникам оптической юстировки и шероховатостям поверхности.

Этот модулятор имеет полосу выше 1000 Мгц и потребляет при этом мощность 10 вт. Таким образом, этот модулятор дает выигрыш в 50 раз по полосе и 100 раз по мощности [5]. Подсчитано, что если использовать 20 каналов связи на оптическом квантовом генераторе с новым типом модулятора, то они могли бы заменить все существующие в США телефонные, телеграфные,

телевизионные и радиоканалы. В космосе такая система связи с использованием оптического генератора обеспечила бы связь на дальности  $10^6$  км.

### Устройство для модуляции излучения с помощью ультразвука

В экспериментальной установке для изучения возможностей такой модуляции был применен ультразвуковой элемент, который устанавливался между активным веществом и одним из зеркал объемного резонатора. Этот элемент представляет собой трубку, наполненную спиртом, с двух сторон которой были расположены кварцевые пластины, обеспечивающие собственную частоту  $3,7$  Мгц.

К этим пластинам подается высокочастотное напряжение от генератора, амплитуда колебаний которого достигает 150 в. Амплитудно-модулированные колебания, подводимые к кварцевым пластинам, вызывают образование стоячих волн в ультразвуковом элементе. Эти волны действуют на излучение как дифракционная решетка. Луч, проходящий через решетку, испытывает отклонения, определяемые зависимостью между ультразвуковыми колебаниями и длиной волны излучения.

В объемном резонаторе возникают колебания только на волне, соответствующей основному виду колебаний, амплитуда которых пропорциональна амплитуде модулирующего сигнала. Это устройство обеспечивает модуляцию на частотах до 30 Мгц при ширине полосы 50% и глубине модуляции 20—30%.

Достоинством этого метода модуляции являются незначительные потери энергии в ультразвуковом элементе, составляющие всего 8% [24, 25].

### Устройство для однополосной модуляции с подавлением несущей

Специально для генераторов с перестраиваемой частотой был разработан оптический метод однополосной модуляции с подавлением несущей [6, 7]. Этот метод основан на том, что плоскополяризованное излучение газового генератора преобразовывалось в излучение с левой поляризацией при прохождении через четвертьволновую двоякотрепломляющую пластину. Затем излу-

чение направлялось на два электрооптических модулирующих элемента, изготовленные из первичного кислого фосфата калия. Размеры элемента составляли  $10 \times 10 \text{ мм}^2$  (сечение) и 7 мм (длина).

К элементу присоединяли прозрачные электроды, расположенные перпендикулярно к излучению. К электродам прикладывалось модулирующее напряжение до 2 кв. В результате получалось, что часть света с левой круговой поляризацией превращалась в свет с правой круговой поляризацией на частотах модуляции, одной боковой полосы.

Свет другой боковой полосы подавлялся, так как фаза напряжения на втором кристалле отстает от фазы напряжения на первом кристалле на  $90^\circ$ , который к тому же развернут относительно первого на  $45^\circ$  по часовой стрелке. Свет, выходящий из второго кристалла, представляет собою смесь левополяризованного света на несущей частоте оптического генератора и правополяризованного света на другой боковой частоте.

В результате последующего прохождения света через вторую четвертьвольновую пластинку и поляризатор на выходе получается только правополяризованный свет. Несущая оказывается подавленной.

## 2. ПРИЕМ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ.

Для извлечения информации из принятых сигналов необходим хороший детектор, обладающий максимальной чувствительностью в передаваемом диапазоне частот, малой инерционностью и узкополосностью.

На рис. 3.1 представлены спектральные характеристики современных приемников видимого и инфракрасного излучения. В настоящее время в качестве приемников наиболее широко используются вакуумные фотоэлементы. Они имеют малую инерционность, а уровень выходного сигнала достаточно велик, что позволяет избежать шумовых помех в последующих усилителях. Однако эти чувствительные элементы имеют и существенный недостаток: их высокая квантовая эффективность ограничена синей, фиолетовой и ультрафиолетовой областью спектра, тогда как излучение большинства оптических генераторов лежит в диапазоне ближнего и дальнего инфракрасного участков спектра.

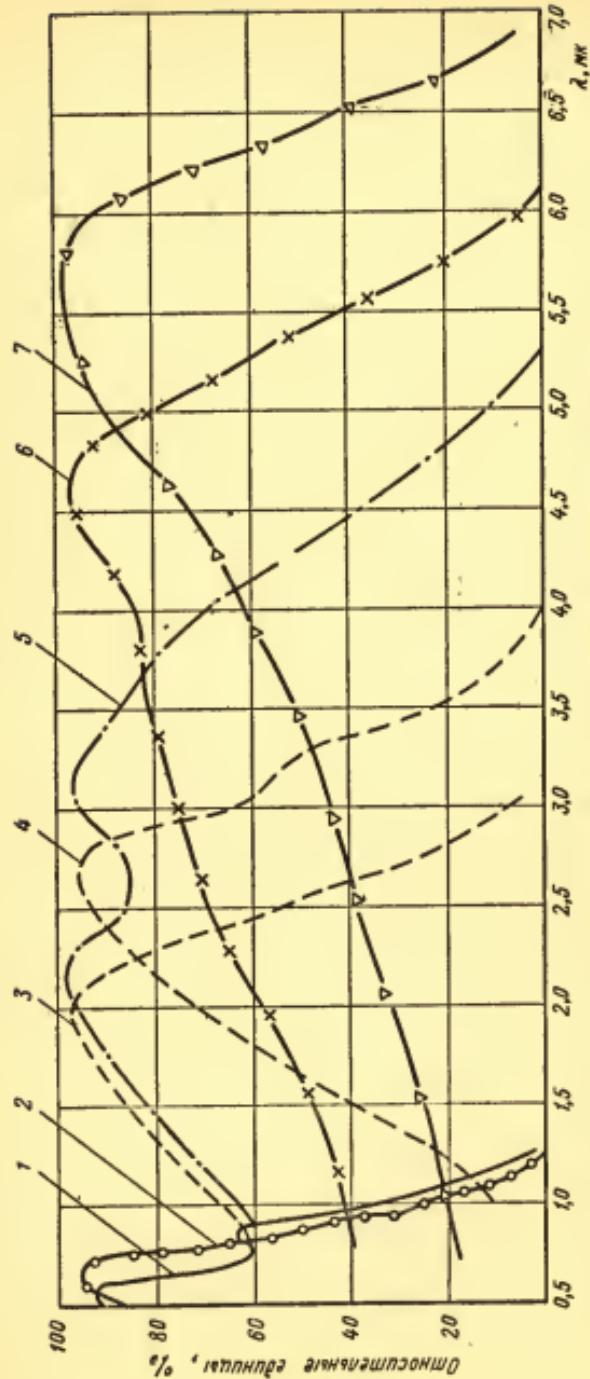


Рис. 3.1. Спектральные характеристики приемников излучения:  
 1 — кислородно-цезиевый фотокатод, 2 — сурьмяно-цизиновый фотокатод, 3 — сернисто-свинцовый ФС ( $+20^{\circ}\text{C}$ ), 4 — сернисто-свинцовый ФС ( $-180^{\circ}\text{C}$ ), 5 — селенисто-свинцовый ФС ( $-180^{\circ}\text{C}$ ), 6 — теллуристо-спинцовый ФС ( $-180^{\circ}\text{C}$ ), 7 — сурьминистый индий-свинцовый ФС ( $-180^{\circ}\text{C}$ ).

Высокой квантовой эффективностью в требуемом участке спектра обладают фотосопротивления. Они также имеют малую постоянную времени, что делает их применение весьма целесообразным. Наиболее широкое применение в качестве приемников находят фотоэлектронные умножители (ФЭУ), что объясняется их малой инерционностью и позволяет использовать их в качестве смесителя для преобразования частоты при одновремением облучении энергией входного сигнала и энергией оптического квантового генератора, выполняющего роль местного гетеродина. Чтобы снизить помехи фона, широкую чувствительность приемников по спектру ограничивают постановкой узкополосного фильтра. Другим путем решения этой задачи является использование хорошошего иешумящего усилителя промежуточной частоты, ширина полосы и максимальная избирательность которого совместимы с заданной шириной полосы. Оба эти пути борьбы с фоном широко исследуются в настоящее время.

Для использования излучения оптических квантовых генераторов в системах связи, необходимо простое демодулирующее устройство, способное выделить из полученного сигнала полезную информацию. Таким образом, рядом с проблемой модуляции излучения оптического генератора стоит и проблема демодуляции излучения, поскольку из имеющихся (до появления квантовых генераторов) демодуляторов ни один не подходил для решения данной задачи. В связи с этим в США были поставлены научно-исследовательские работы по созданию новых типов демодуляторов [21, 22, 23].

Основные работы развернулись по созданию оптического гетеродина. Гетеродинирование на оптических частотах в принципе не отличается от гетеродинирования на радиочастотах за исключением того, что в первом случае не требуется предварительного усиления сигнала. Метод оптического гетеродинирования состоит в следующем. На детекторе с помощью оптических систем совмещаются принимаемое излучение и излучение оптического гетеродина, находящегося в приборе (местного гетеродина). Чувствительная поверхность детектора реагирует на разностную частоту обоих излучений, в результате чего на выходе его возникает ток сигнала, пропорциональный разностной частоте.

Поскольку чувствительная поверхность обладает квадратичным законом детектирования, ток сигнала пропорционален квадрату суммы взаимодействующих излучений. В результате квадратичного процесса, протекающего в детекторе, осуществляется умножение принятого сигнала на опорный сигнал местного гетеродина, а после этого узкополосный усилитель интегрирует полученный результат. Эта комбинация умножения и интегрирования при когерентном детектировании эквивалентна процессу взаимной корреляции, который позволяет достигнуть значительно большей чувствительности, чем при некогерентном детектировании.

Если опорный сигнал местного гетеродина является чистой синусоидой, то влияние окружающего фона, а также влияние темнового тока в детекторе становится пренебрежимо малым.

Для оптической гетеродинной системы пригодны все виды модуляции — фазовая, амплитудная и модуляция на одной боковой несущей. Однако модулятор должен обеспечивать такое воздействие на излучение, чтобы не нарушить его когерентности.

В любой оптической гетеродинной системе разность частот генератора-передатчика и генератора-гетеродина должна поддерживаться постоянной при помощи автоматической подстройки частоты. В экспериментальной установке, работа которой была продемонстрирована в начале 1963 г. [30], применялись два газовых оптических генератора: один в качестве передатчика, другой в качестве местного гетеродина. Излучение генератора-передатчика модулировалось частотой 50 кГц, а также телефонными сигналами и направлялось на ФЭУ. С помощью плоского зеркала на ФЭУ направлялось также излучение от местного гетеродина. Промежуточная частота с выхода ФЭУ подается на усилитель промежуточной частоты и после ограничения на дискриминатор. Сигнал с дискриминатора подается на детектор, выделяющий из высокой частоты телефонные сигналы.

В установке была предусмотрена система автоподстройки частоты местного гетеродина, которая «уходит» при изменении температуры окружающей среды вследствие изменения длины объемного резонатора.

Управляющий сигнал, пропорциональный разности частот генератора передатчика и местного гетеродина,

снимается с дискриминатора, усиливается и поступает на пьезоэлектрический преобразователь, который и производит подстройку частоты [30].

Экспериментально было установлено, что стабильность разности частот двух оптических генераторов поддерживается с точностью, лежащей в пределах 3 кГц, что дает относительную стабильность  $10^{-11}$ , которая практически достаточна для целей оптической связи.

Одни из разработанных недавно демодуляторов [8, 9, 10] представляет собой вакуумный фотоэлемент, который соединен с микроволновым волноводом. Такой демодулятор, принимая световой поток, промодулированный микроволновым сигналом, преобразовывает оптический сигнал в поток электронов, которые эмиттируются его фотокатодом. Этот поток электронов фокусируется и пропускается через микроволновый волновод, в котором происходит выделение микроволнового сигнала. Демодулятор такого типа отличается простотой, малыми размерами и надежностью работы. Он позволяет демодулировать сигналы, которые лежат в спектральном диапазоне от 0,3 до 1,2 мк и промодулированы частотами от 8 до 12 Гц. Наиболее целесообразным считается применение этого прибора для демодуляции маломощных оптических квантовых генераторов [11].

В начале 1963 г. был разработан микроволновый ФЭУ типа А-1283, специально предназначенный для демодуляции излучения оптических генераторов [12, 13].

Отличительные особенности этого демодулятора состоят в том, что в нем вместо термоэлектрононого оксидного катода используется фотокатод проходного типа, а фотоэлектроны поступают на спираль лампы бегущей волны, с которой снимается модулирующий сигнал. Такая комбинация фотокатода с лампой бегущей волны привела к появлению нового типа радиолампы, называемой фото-ЛБВ. Была также продемонстрирована экспериментальная установка, предназначенная для демодуляции сигналов с одной боковой полосой.

Демодуляция сводится к восстановлению подавленной несущей и смешения с нею принятых сигналов. В установке применяется сдвоенный смеситель и это дает возможность использовать фазовый метод однополосного приема [14, 15].

### 3. УПРАВЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*Устройство для управления с помощью ультразвука.* На рис. 3.2 показана блок-схема такой установки, в которой эффект преломления, вызываемый ультразвуковой ячейкой, используется для получения мощных импульсов от рубинового оптического генератора. Ячейка помещается между рубиновым кристаллом и одним из концевых отражающих зеркал оптического квантового

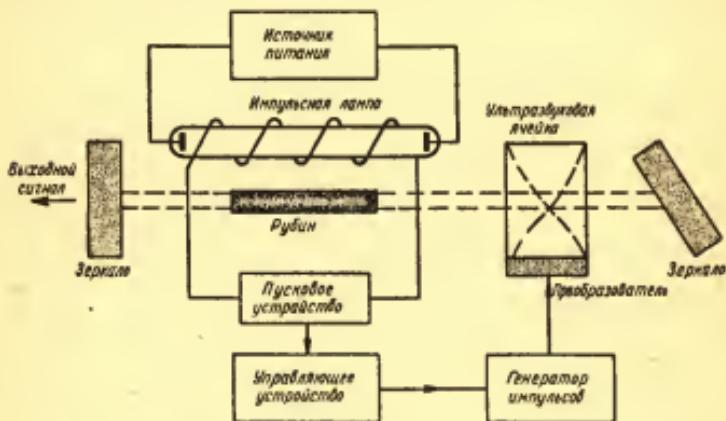


Рис. 3.2. Схема использования ультразвуковой ячейки для получения мощных импульсов ОКГ.

генератора. Зеркало наклонено так, чтобы предотвратить прямое действие генератора. Излучение возможно лишь при включении ультразвукового элемента, в результате чего в ячейке создаются бегущие электромагнитные волны и коэффициент преломления среды изменяется по синусоидальному закону. Луч рубинового стержня совершает периодические колебания относительно кристалла, в результате чего в определенный момент происходит отражение от наклонного зеркала.

С помощью такого устройства можно создать импульсы излучения мощностью 1 Мвт, длительностью 75 нсек при времени нарастания 30 нсек [16]. На рис. 3.3 изображена блок-схема установки с двумя ультразвуковыми ячейками, используемыми для изменения направления луча оптического генератора. Ячейки устанавливаются на выходе генератора перпендикулярно друг другу. Возбуждение ячеек идентичными амплитудно-

модулированными сигналами вызывает спиральное сканирование. Изменяя мощность, частоту и фазу сигналов, подаваемых на ячейки, можно получать различные сложные картины сканирования.

*Устройство для сужения луча оптического генератора.* В гл. 1 было показано, что угловой раствор луча обратно пропорционален диаметру активного вещества. Однако с увеличением диаметра стержня в объемном

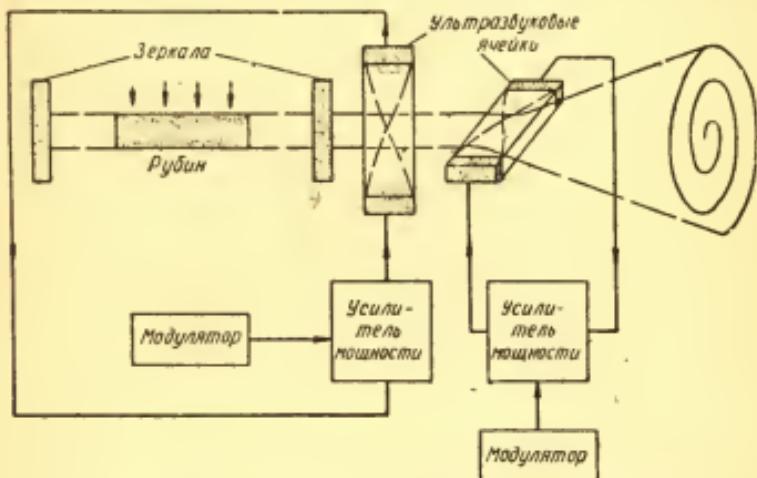


Рис. 3.3. Схема использования ультразвуковой ячейки для управления лучом ОКГ.

резонаторе резко возрастает число видов колебаний на частотах, отличающихся от основной. Это вызывает уширение полосы, в результате чего ухудшается монохроматичность и когерентность излучения и затрудняется возможность сужения луча до величины, близкой к теоретическому пределу.

Все это приводит к тому, что обычная ширина луча оптического квантового генератора на рубине составляет  $10^{-2}$  рад, хотя, как показывают теоретические расчеты, может быть получена ширина луча  $10^{-4}$  рад. В связи с этим исследуется метод сужения луча импульсного оптического генератора на рубине [17], основанный на подавлении других видов колебаний при помощи селекторов, помещаемых между активным веществом и выходной полупрозрачной отражательной пластиной объемного резонатора (рис. 3.4).

Селекторы представляют собой две пары полупрозрачных дисков, параллельных друг другу. Каждая пара наклонена под различными углами  $\theta_1$  и  $\theta_2$  к плоскости нормальной оси прибора. Угол наклона составляет несколько градусов. Каждая пара дисков образует фильтр определенных видов колебаний. В одном из устройств используются диски диаметром 28,6 мм с расстоянием между ними 3,2 мм. Отражательная способ-

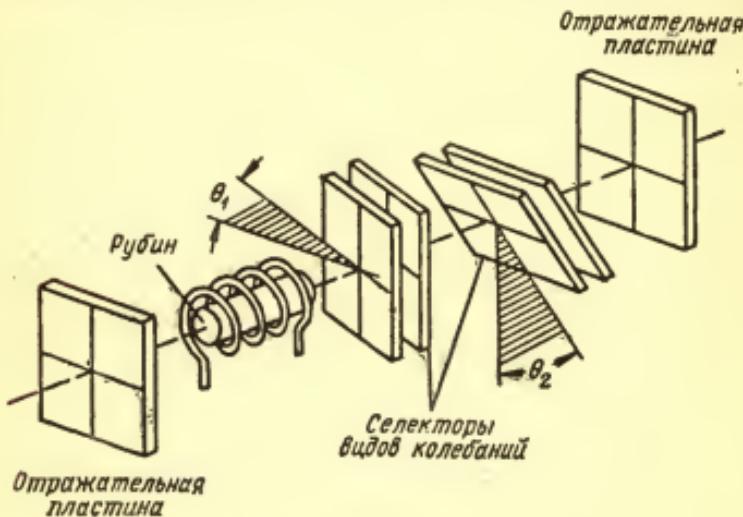


Рис. 3.4. Устройство для сужения луча ОКГ.

нность селекторов составляет 70, 80 и 93%, а полосы пропускания — 3800, 1600 и 790 Мгц. Диаметр рубинового стержня составлял 1 см, а длина — 4 см. Отражательные пластины объемного резонатора имели многослойные отражающие покрытия, обеспечивающие коэффициент отражения около 99%, расстояние между пластинаами составляло 47 см.

Исследования показали, что селектор такого типа выделяет из 160 частот, генерируемых оптическим генератором, четыре частоты, отстоящие одна от другой на 319 Мгц, а ширина луча в этом случае близка к теоретической. Эти результаты были получены при ориентации плоскостей селекторов под углами около  $2^\circ$  к плоскости, перпендикулярной оси прибора. Предполагается, что можно получить излучение рубинового генератора

на одной частоте, соответствующей  $6943 \pm 0,0002 \text{ \AA}$ , если метод распространить на другие типы генераторов, работающих как в импульсном, так и в непрерывном режиме.

*Управление излучением при помощи неоднородного магнитного поля.* Возможность управления выходным излучением оптического генератора с помощью неоднородного магнитного поля была исследована экспериментально [18]. Для этого применялся покрытый сапфировой оболочкой кристалл рубина с нулевой ориентацией *C*-оси. Источник возбуждения и рубин помещались в эллиптическом отражателе. Неоднородное магнитное поле создавалось током, текущим вокруг рубинового стержня по медному витку. Магнитное поле в этом случае вызывало уширение линии  $R_1$  рубина и задерживало стимулированное излучение. Минимальное магнитное поле в центре витка, необходимое для задержки излучения, составляло около 25 кгс при комнатной температуре и 6 кгс при 77° К. При наличии неоднородного магнитного поля наблюдалось увеличение амплитуд задержанных импульсов излучения. Предполагается, что рубиновый образец при ориентации *C*-оси, характеризуемой углом 90°, более чувствителен к модуляции неоднородным магнитным полем [18].

Магнитное поле, создаваемое в момент максимальной мощности возбуждения, препятствует излучению. Энергия запасается в рубине, и только после того, как поле исчезнет, излучается в виде когерентного света. В этом случае выигрыш по мощности излучения возрастает в 1000 раз. Магнитное поле, величина которого в центре стержня достигает 60 кгс и к краям падает до 8 кгс, создается одним витком медной проволоки, через которую разряжается конденсатор, создавая при этом ток 138 ка.

Если эксперимент проводился при комнатной температуре, то для получения аналогичных результатов требовалось поле интенсивностью 600 кгс [19, 20].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Electronics, 1963, v. 36, № 17, p. 8—10.
2. Proc. IEEE, 1963, v. 51, № 1, p. 98.
3. Telecommunication J., 1962, v. 29, № 12, p. 359.
4. Proc. IEEE, 1963, v. 51, № 1, p. 185.

5. Electronic News, 1962, 15/X, v. 7, № 342, p. 27.
6. Electronics, 1962, 24/VIII, № 34, p. 21.
7. Electronic News, 1962, 20/VIII, № 332, p. 53.
8. Electronics Weekly, 1963, 6/III, № 131, p. 21.
9. Missiles and Rockets, 1963, 18/II, № 7, p. 23.
10. Electronic News, 1963, 25/II, № 262, p. 25.
11. Proc. IEEE, 1963, v. 5, № 4, p. 614—615.
12. Electronic Design, 1963, 15/III, № 6, p. 154.
13. Electronic News, 1963, 27/III, № 368, p. 68.
14. Proc. IRE, 1959, v. 44, № 12, Dec., p. 1735—1743.
15. Proc. IEEE, 1963, v. 5, № 4, Apr., p. 610—611.
16. Electronics, 1962, 5/X, № 40, p. 40.
17. Electronic News, 1962, 12/XI, v. 7, № 346, p. 1, 5.
18. Electronic News, 1962, v. 7, № 325, p. 24.
19. Electronics Weekly, 1962, № 97, p. 17.
20. Electronics, 1962, v. 35, № 29, p. 60, 62.
21. Proc. IEEE, 1963, № 5, p. 857—858.
22. Electronic Design, 1963, v. 11, № 12, 7/VI, p. 4—6.
23. Electronics, 1963, v. 36, № 28, 12/VII, p. 29—31.
24. Electronics, 1963, v. 36, № 15, 12/IV, p. 22.
25. Electronic Design, 1963, v. 11, № 10, 10/V, p. 9—10.
26. Interavia Letter, 1963, 1/X, № 5340, p. 7.
27. Electronics, 1963, 20/IX, № 38, p. 17.
28. Applied Optics, 1963, X, № 10, p. A14. -
29. Aviation Week, 1963, 3/VI, № 22, p. 77.
30. Electronics, 1963, 12/VII, № 28, p. 29—31.
31. Phys. Letters, 1963, v. 7, № 5, p. 330—331.
32. Appl. Phys. Letters, 1963, v. 3, № 11, p. 203—205.
33. Appl. Phys. Letters, 1963, v. 3, № 9, p. 145—148.
34. New Scientist, 1963, v. 20, № 367, p. 556.
35. Aviation Week, 1963, v. 79, № 17, p. 95—97.
36. Wescon Technic. Papers, 1963, № 3, p. 14/1.
37. IEEE Internat. Conv. Rec., 1963, v. 11, № 8, p. 142—152.
38. Bell Syst. Techn. J., 1963, v. 42, № 6, p. 2621—2678.

## ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

### ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ В АРМИИ И ВОЕННО-МОРСКОМ ФЛОТЕ

#### 1. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ

Оптический участок спектра электромагнитных волн простирается от микроволн до рентгеновских лучей и занимает участок от 750 мк до 50 Å. Подробное деление этого участка на отдельные области приведено в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Области оптического участка спектра	Длина волн	
	в наиболее употребительных единицах	в сантиметрах
Инфракрасные лучи:		
длиниволновые	750—25 мк	$7,5 \cdot 10^{-2}$ — $2,5 \cdot 10^{-3}$
средневолновые	25—2,5 мк	$2,5 \cdot 10^{-3}$ — $2,5 \cdot 10^{-4}$
коротковолновые	2,5—0,76 мк	$2,5 \cdot 10^{-4}$ — $0,76 \cdot 10^{-4}$
Видимые лучи:		
красные	7 600—6 200 Å	$0,76 \cdot 10^{-4}$ — $0,62 \cdot 10^{-4}$
оранжевые	6 200—5 000 Å	$0,62 \cdot 10^{-4}$ — $0,59 \cdot 10^{-4}$
желтые	5 900—5 600 Å	$0,59 \cdot 10^{-4}$ — $0,56 \cdot 10^{-4}$
зеленые	5 600—5 900 Å	$0,56 \cdot 10^{-4}$ — $0,5 \cdot 10^{-4}$
голубые	5 000—4 800 Å	$0,5 \cdot 10^{-4}$ — $0,48 \cdot 10^{-4}$
синие	4 800—4 500 Å	$0,48 \cdot 10^{-4}$ — $0,45 \cdot 10^{-4}$
фиолетовые	4 500—4 000 Å	$0,45 \cdot 10^{-4}$ — $0,4 \cdot 10^{-4}$
Ультрафиолетовые лучи	4 000—50 Å	$0,4 \cdot 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-7}$
Рентгеновские лучи	50—0,04 Å	$5 \cdot 10^{-7}$ — $4 \cdot 10^{-10}$
γ-лучи	0,04 Å и короче	$4 \cdot 10^{-10}$ и короче

- Инфракрасные лучи занимают довольно широкую область спектра. Они обладают теми же свойствами, что и видимые лучи, т. е. распространяются прямолинейно, преломляются с помощью оптических систем и поляризуются. Эти лучи невидимы глазом, и поэтому они могут быть обнаружены только с помощью специальных устройств (инфракрасных фотопластинок, электронно-оптических преобразователей, фотоэлектрических и тепловых индикаторов).

Видимые лучи занимают очень небольшой участок электромагнитного спектра. Их свойства и особенности известны из курса физики.

Ультрафиолетовые лучи также невидимы глазом, и они могут быть обнаружены либо фотографическими методами по вызываемой этими лучами флуоресценции и фосфоресценции, либо при помощи фото- и термоэлементов.

Использование оптических излучений в условиях атмосферы затрудняется тем, что атмосфера значительно поглощает оптические излучения. Степень и характер этого поглощения зависят от состава и свойств атмосферы, которые значительно изменяются с высотой над уровнем земли, а также от длины волны излучения.

Атмосфера представляет собой среду, состоящую из смеси газов и водяного пара со взвешенными в ней твердыми частицами (пылью). Проходя через эту среду, оптическое излучение ослабляется вследствие поглощения и рассеяния. В первом случае лучистая энергия превращается в другие виды энергии (главным образом в тепловую), во втором — лучи отклоняются, так что в первоначальном направлении проходит только часть падающего потока. Прохождение излучения через атмосферу сильно зависит от метеорологических условий и в первую очередь от влажности атмосферы. Чем больше влаги в атмосфере, тем больше будет поглощение [40, 41].

Рассеяние зависит от размеров и характера распределения частиц в атмосфере и при соизмеримости размеров частиц с длиной волны коэффициент рассеяния обратно пропорционален длине волны излучения в четвертой степени. Поэтому в очень чистом воздухе инфракрасные лучи ослабляются меньше, чем видимые.

Количество водяного пара в атмосфере зависит от географической широты местности и температуры (с по-

нижением температуры количество водяного пара понижается). С увеличением высоты количество влаги в атмосфере тоже уменьшается. Влажность воздуха на высоте 2000 м в два раза, а на высоте 10 000 м в сто раз меньше, чем у земли. На границе тропосферы наличие влаги становится очень незначительным.

Углекислый газ и озон, хотя и содержатся в атмосфере в небольшом количестве, также ухудшают прозрачность ее для оптических излучений. С увеличением высоты до 25 км концентрация углекислого газа не меняется, а на высоте более 70 км от этих газов остаются только следы.

Наличие твердых частиц в атмосфере определяется не только состоянием погоды и географической средой, но и деятельностью человека. При значительной запыленности атмосферы ее прозрачность резко ухудшается.

Поглощение лучей атмосферой селективно: слой воздуха является фильтром, ослабляющим излучение очень неравномерно по спектру. В спектре лучей, пропущенных слоем воздуха, имеется ряд полос поглощения, вызываемых водяными парами, углекислым газом, озоном и другими газообразными веществами [40]. Главную роль, однако, играют пары воды. Их полосы поглощения, соответствующие участкам спектра 1,3—1,5; 1,8—2,0; 2,5—3 и 5—8 мк, перекрывают в приземном слое воздуха полосы поглощения других газообразных веществ. На высотах, где влияние паров воды значительно ослаблено, возникают полосы поглощения, вызванные наличием озона и метана. Поглощение ультрафиолетовых лучей значительно, и характер этого поглощения до высоты 11 км почти не меняется.

В результате избирательного поглощения для спектральных кривых пропускания характерны полосы прозрачности, так называемые «окна прозрачности атмосферы» (рис. 4.1а). Наибольшему пропусканию соответствуют окна 0,95—1,05; 1,2—1,3; 1,6—1,75; 2,1—2,4 (пропускание до 80%); 3,4—4,2 (пропускание выше 90%) и 8—12 мк (пропускание 60—70%). С увеличением высоты ширина полос прозрачности увеличивается (рис. 4.1б) вследствие уменьшения плотности воздуха и количества водяных паров в нем.

В связи с оценкой возможности применения оптических квантовых генераторов на русле в наземных при-

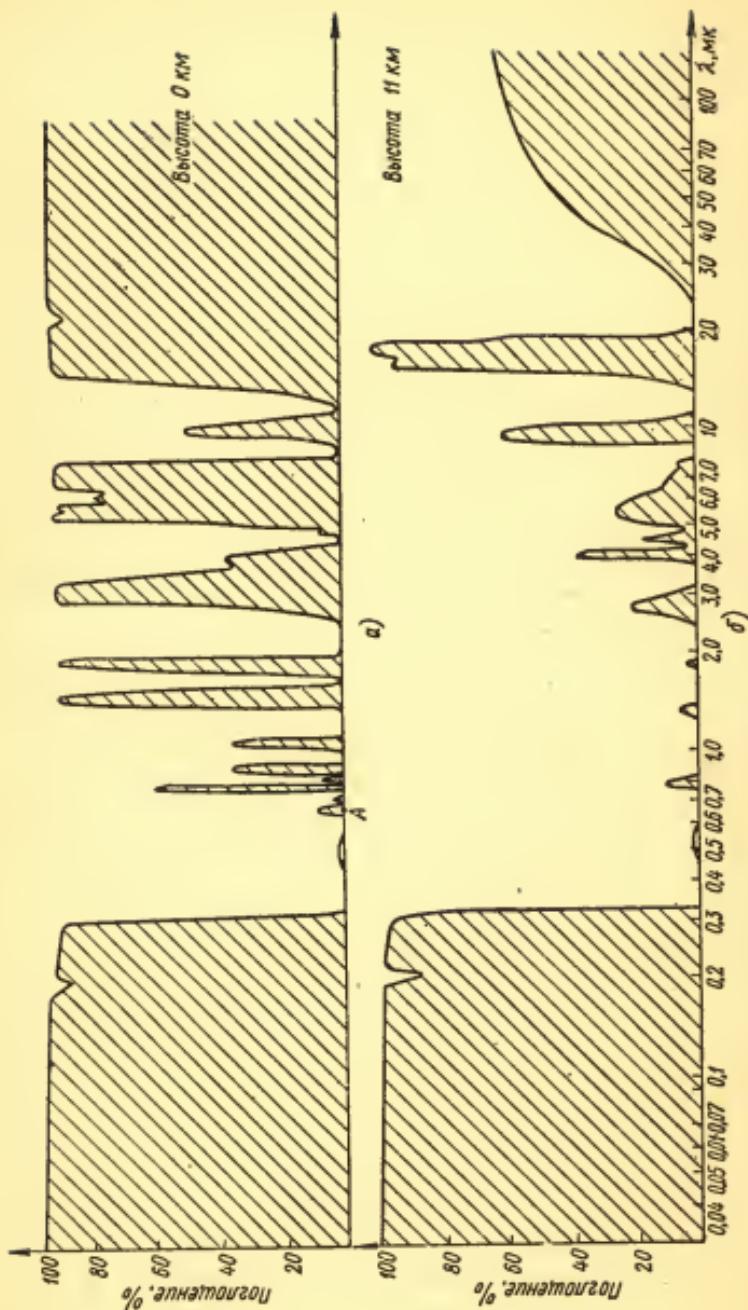


Рис. 4.1 а и б. Спектральная прозрачность атмосферы на уровне моря и на высоте 11 км.

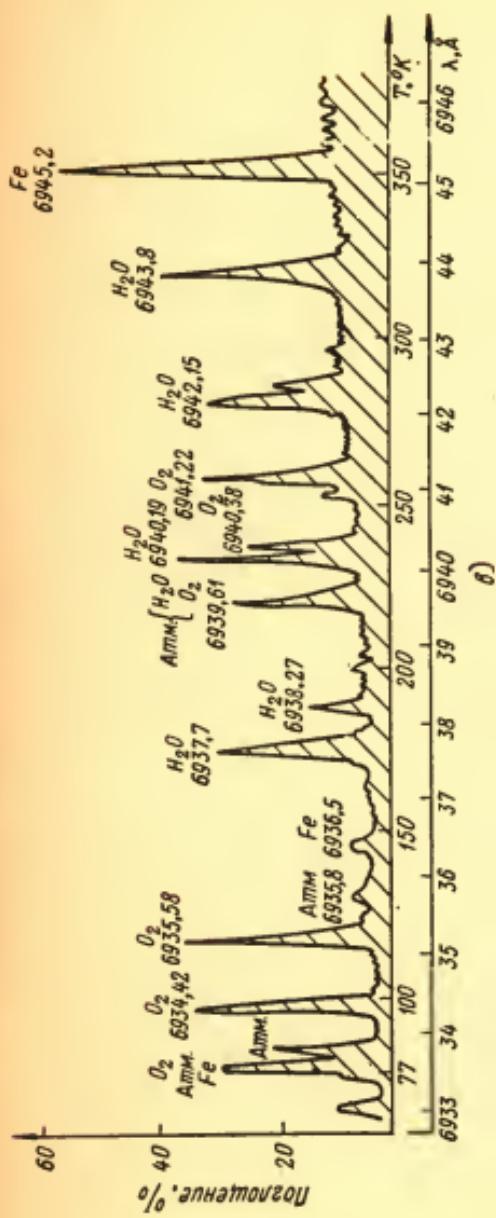


Рис. 4.1в. Тонкая структура поглощения излучения атмосферой в точке А (рис. 4.1а).

борах были проведены исследования тонкой структуры поглощения атмосферы на участке 6933—6946 Å (точка A на рис. 4.1а). Ширина этого участка выбрана из расчета, что длина волны, излучаемая таким генератором, меняется в этих пределах, если изменять температуру активного вещества от 0 до 450° К.

В качестве источника излучения в эксперименте использовалось Солнце, излучение которого, прошедшее через атмосферу, регистрировалось с помощью спектрометра с высокой разрешающей способностью. Результаты эксперимента показаны на рис. 4.1в, на котором приведена тонкая структура поглощения излучения атмосферой и хорошо видна селективность этого поглощения.

Основные линии поглощения связаны с наличием в земной атмосфере водяных паров и кислорода.

Имеющиеся линии поглощения железа не должны учитываться из-за их солнечного происхождения. На этом же рисунке приведена шкала длин волн оптического генератора как функция температуры активного вещества. Из рассмотрения этой шкалы видно, что если активное вещество охлаждать до температуры 77—89° К, то его излучение лежит в области поглощения. В случае, когда не применяется охлаждение, т. е. в интервале температур 318—340° К, не наблюдается заметного поглощения, так как линии поглощения разнесены на большой интервал.

Используя этот график, можно практически оценить дальность действия систем, применяющих в качестве источника излучения генераторы на рубине при работе их в условиях атмосферы.

Вместе с тем наличие тонкой структуры поглощения говорит о том, что даже при небольшом изменении температуры активного вещества (что приводит к изменению длины волны излучения) поглощение может меняться в широких пределах. В условиях верхних слоев атмосферы и космического пространства электромагнитные колебания оптического диапазона распространяются практически без потерь.

## 2. НЕКОТОРЫЕ ТРУДНОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ

Зарубежные специалисты считают, что для того, чтобы оптические квантовые приборы нашли широкое практическое применение в военной технике, должны быть решены следующие вопросы: уменьшено влияние спонтанного излучения, устранено влияние допплеровского эффекта при значительных скоростях объектов, обеспечено наведение и удержание узкого луча оптического генератора в заданном направлении и уменьшено влияние внешних шумов.

Доля спонтанного излучения сильно возрастает с переходом на оптический диапазон волн. Известно, что отношение спонтанного излучения к стимулированному при одной и той же плотности излучения пропорционально величине  $\frac{\rho(\lambda)}{\lambda^3}$ , где  $\rho(\lambda)$  — плотность излучения на волне  $\lambda$ .

Поскольку длина световых волн примерно в  $10^4$  раз короче волн сантиметрового диапазона, то при переходе от СВЧ диапазона к оптическому величина спонтанного излучения возрастает в  $10^{12}$  раз [42]. Поэтому пренебрегать спонтанным излучением, как это делается в квантовых приборах СВЧ диапазона, в этом случае нельзя.

Однако имеется и благоприятный момент, заключающийся в том, что значительно уменьшается влияние теплового шума. В оптическом диапазоне, где  $h\nu \gg kT$ , тепловым шумом можно пренебречь и усиление ограничивается главным образом спонтанным излучением, соответствующим температуре шума  $\frac{h\nu}{k}$ , которая оказывается порядка  $10^4$ °К.

Допплеровский эффект также накладывает особые условия на использование оптического диапазона волн. Частоты оптического диапазона составляют 100—1000 Гц и на четыре порядка превосходят частоты микроволнового диапазона. Это приводит к тому, что с использованием оптических излучений становится возможным измерять относительную скорость медленно перемещающихся объектов (танк, корабль и даже пешеход), так как легко уловить изменение частоты сигналов. Однако при значительных скоростях объектов допплеровское изменение частоты настолько значительно,

что необходимы очень широкополосные приемники излучений и специальные устройства для компенсации изменения скорости, особенно когда оптические квантовые приборы применяются в системах связи.

На рис. 4.2 показано, какой должна быть ширина полосы пропускания приемника для двух оптических квантовых генераторов при изменении скорости от 1 до 16 км/сек (преследующие и встречные курсы космических аппаратов).

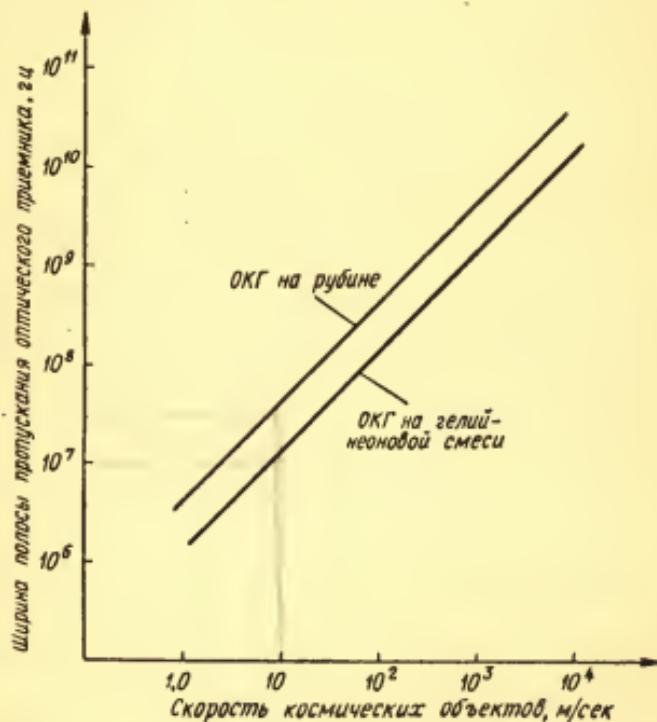


Рис. 4.2. Изменение частот оптических генераторов вследствие эффекта Допплера.

И, конечно, одной из самых значительных особенностей военного применения оптических квантовых генераторов считается трудность наведения и удержания узкого луча на заданном объекте.

Если эту трудность как-то преодолевают при использовании оптических квантовых приборов в наземных условиях на неподвижных установках, то применение этих приборов на подвижных основаниях требует созда-

ния высокоточных автоматических «прицельных» устройств и стабилизированных платформ.

Применимость аппаратуры ограничивается также мешающими посторонними сигналами (внешние шумы). В оптическом диапазоне частот основным источником шума является тепловое излучение посторонних источников.

Известно, что интенсивность излучения нагретого тела пропорциональна четвертой степени его температуры, а спектральный состав носит широкополосный характер.

Наиболее мощным источником шумов является Солнце, температура которого составляет  $5840^{\circ}\text{K}$ . Луна и звезды также являются источниками шума, хотя и в меньшей степени. В табл. 4.2 приведены значения плотности мощности шума от раз-

Таблица 4.2

Источник шума	Плотность мощности шума в интервале $10\text{\AA}$ , $\text{вт}/\text{см}^2$	
	$\lambda = 6943\text{\AA}$	$\lambda = 11500\text{\AA}$
Солнце	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$
Луна	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$5,2 \cdot 10^{-11}$
Звезды	$1,0 \cdot 10^{-12}$	$4,0 \cdot 10^{-14}$

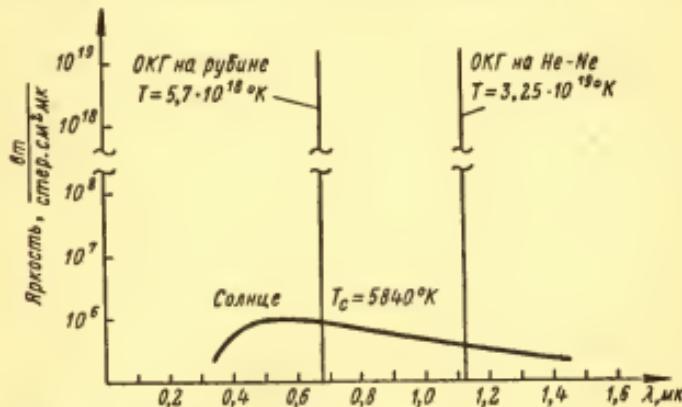


Рис. 4.3. Спектральная яркость оптических квантовых генераторов и Солнца.

личных источников, определенные для двух длин волн (оптический квантовый генератор на рубине, на телии и неоне) в интервале  $10\text{\AA}$  [43].

Для борьбы с внешними шумами используют узкополосные фильтры, которые хотя и не устраняют эти шумы, но уменьшают их влияние. Поскольку спектраль-

ная яркость оптических квантовых генераторов значительно превышает спектральную яркость Солнца (рис. 4.3), то, применяя такие фильтры, можно получить значительные превышения полезного сигнала над сигналом шума. В этом случае оптическая аппаратура может быть использована не только вочных, но и в дневных условиях [56].

### 3. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ В АРМИИ И ВОЕННО-МОРСКОМ ФЛОТЕ

Поскольку считается, что применение оптических квантовых приборов в аппаратуре военного назначения значительно улучшит ее тактико-технические характеристики, в военных кругах США настолько возрос интерес к оптическим квантовым приборам, что Министерство обороны финансирует практически все основные теоретические и прикладные исследования в этой области. Над разработкой образцов аппаратуры по тематике, заданной военными организациями, в настоящее время работают несколько десятков фирм [1, 24, 25].

В начале 1962 г. состоялся симпозиум по техническому применению оптических квантовых приборов, организованный НАТО и Штабом Верховного Главнокомандующего Объединенными вооруженными силами в Европе. В докладах, представленных на симпозиуме, основной упор был сделан на вопросы конструкции и технологии оптических квантовых приборов [2].

Большой интерес на симпозиуме вызвал доклад Ч. Таунса, который описал современное состояние разработок квантовых приборов и их потенциальные возможности. В его докладе приводились полученные характеристики квантовых приборов: стабильность частоты порядка  $10^{-14}$ , плотность лучистой энергии  $10^{11} \text{ вт/см}^2$ , пиковая мощность  $10 \text{ Мвт}$ , угловой раствор луча  $5 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$ . Таунс указал на возможность использования оптических квантовых приборов в системах дальней связи, создания сверхточных локаторов с разрешающей способностью до нескольких сантиметров и определения

\* В экспериментальных работах, проведенных в течение 1963 г., были получены более значительные плотности лучистой энергии и пиковые мощности.

скорости движения объектов допплеровским методом с высокой точностью. По его словам, такие вопросы, как передача энергии с помощью луча оптического квантового генератора (особенно в безвоздушном пространстве) и непосредственный контроль за положением воздушных носителей и спутников с поверхности земли с помощью узкого луча света, в настоящее время хорошо теоретически изучены и ожидают своего практического решения.

Ускоренными темпами развитие техники квантовых приборов идет и во Франции, Англии, Италии, Швейцарии, ФРГ и Японии. Эти исследования также финансируются и поддерживаются правительственными и военными учреждениями [3].

По данным иностранной печати, в военной технике сухопутных и морских вооруженных сил с помощью оптических квантовых приборов можно успешно решать следующие задачи:

- определение направления и дальности до цели на поле боя, в воздухе, на воде и под водой [4, 5, 6, 7, 8, 27, 28, 35, 62, 63];
- установление многоканальной помехозащищенной связи между несколькими корреспондентами (танками, кораблями, подводными лодками, командными пунктами) [9, 10, 11, 14, 15, 16, 64, 65, 66];
- наведение управляемых снарядов по лучу [1];
- слежение за целью и непрерывная выдача данных о ее координатах [19, 20, 21, 67, 68, 69];
- измерение угловой скорости вращения и углового положения военной аппаратуры относительно заданного направления [22, 23];
- решение различных военных задач с использованием малогабаритных быстродействующих оптических вычислительных машин [12];
- ослепление и поражение живой силы противника и чувствительных элементов военной техники лучистым потоком высокой плотности [12, 29, 30, 70, 71].

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ДАЛЬНОМЕРЫ

Первая экспериментальная установка для измерения дальности была создана в США в 1961 г. [4, 27, 28]. Она не отличалась совершенством, была сделана из доступ-

ных материалов и оборудования и предназначалась для выявления особенностей оптических квантовых генераторов, для оценки факторов, ограничивающих действие дальномерной системы и поиска путей ее улучшения.

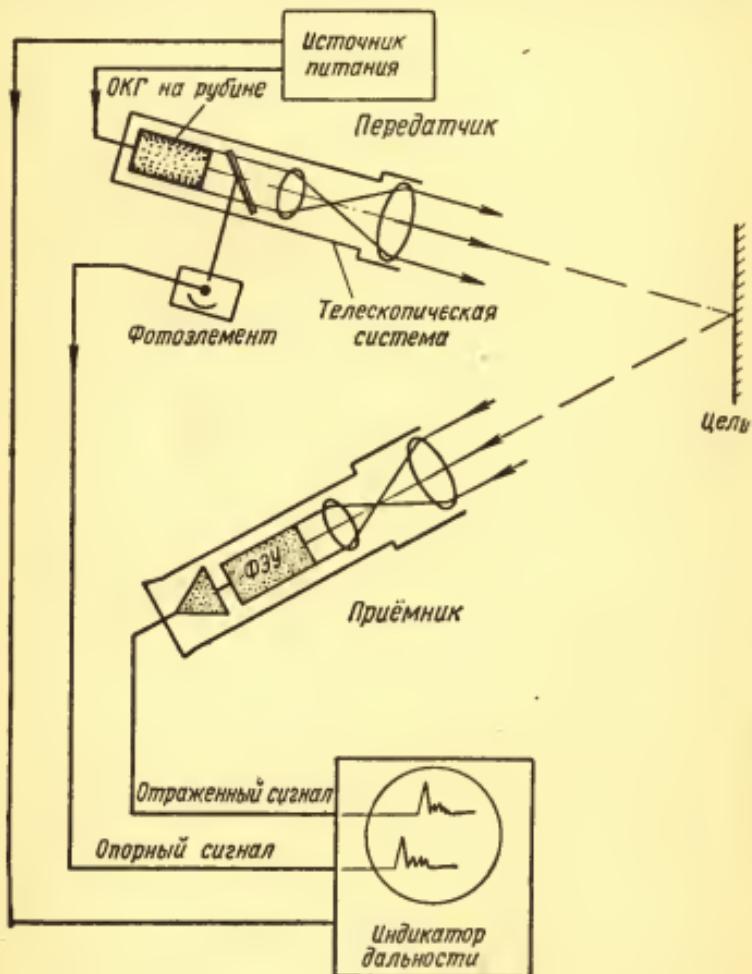


Рис. 4.4. Блок-схема экспериментального оптического дальномера.

Оптический дальномер состоит из трех основных узлов: передатчика, приемника и индикатора (рис. 4.4).

Передатчик состоит из оптического квантового генератора на рубине, телескопической системы и вспомога-

тельных устройств. В качестве источника излучения в передатчике используется оптический квантовый генератор с рубиновым стержнем длиной 8 см, спиральная импульсная ксеноновая лампа и цилиндрический рефлектор. Импульсная лампа питается от конденсаторов емкостью 2000 мкФ, которые заряжались до напряжения 1350 в. Излучение рубина фокусируется телескопической системой, которая обеспечивает сужение луча до 0,4 мрад.

Основные характеристики передающей части приведены ниже:

Потребляемая передатчиком энергия . . . . .	1 200 дж
Пиковое значение выходной мощности . . . . .	до 2 000 вт
Длина волны излучаемой энергии . . . . .	0,6943 мк
Ширина полосы излучаемой энергии . . . . .	0,00001 мк
Ширина пучка энергии, излучаемой рубином . . . . .	12 мрад (0,7°)
Ширина пучка энергии на выходе телескопической системы . . . . .	0,4 мрад (1,4°)

На рис. 4.5 показан внешний вид оптического квантового генератора со снятым рефлектором. Рубиновый стержень, находящийся внутри спиральной лампы, отчетливо виден на фотографии.

Одним из дополнительных элементов прибора является фотоэлемент опорного сигнала, устанавливаемый на телескопе передающей части. На этот элемент с помощью зеркала направляется световой поток от оптического генератора. Фотоэлемент, подключенный ко второму каналу двухлучевого осциллографа, выдает на его экран опорный импульс.

Приемник состоит из оптической системы, двух светофильтров (широкополосного и узкополосного), диафрагмы, чувствительного элемента (ФЭУ) и предусилителя (рис. 4.6).

Характеристика спектральной чувствительности ФЭУ показана на рис. 4.7. Непосредственно за ФЭУ расположен предварительный усилитель, сигнал с которого подается на двухлучевой осциллограф, используемый в качестве индикаторного устройства.

Дальномер работает следующим образом. Световой поток от оптического генератора направляется на объект, до которого необходимо измерить дальность. Часть этого потока, отведенная на фотоэлемент, обеспечивает высвечивание на экране осциллографа опорного им-

пульса. Отраженный от цели световой поток улавливается оптической системой приемной части и преобразуется в электрический сигнал, который также дает отметку на экране осциллографа. Эта отметка смещена относительно первой. Величина смещения определяется только дальностью до цели.



Рис. 4.5. Внешний вид ОКГ со снятым рефлектором.

Все эксперименты выполнялись с неохлаждаемым оптическим генератором. На рис. 4.8 приведена фотография выходного сигнала с экрана осциллографа, который представляет собой целую серию пиков, растянутых во времени до 400 мксек. При охлаждении генератора парами жидкого азота наблюдалось значительное улучшение его выходного сигнала. Так, если без охлаждения оптического генератора выходная мощность излучения составляет 600 вт, то при охлаждении она достигает 2000 вт.

Изменяется также характер огибающей сигнала. Момент начала генерации становится более определенным,

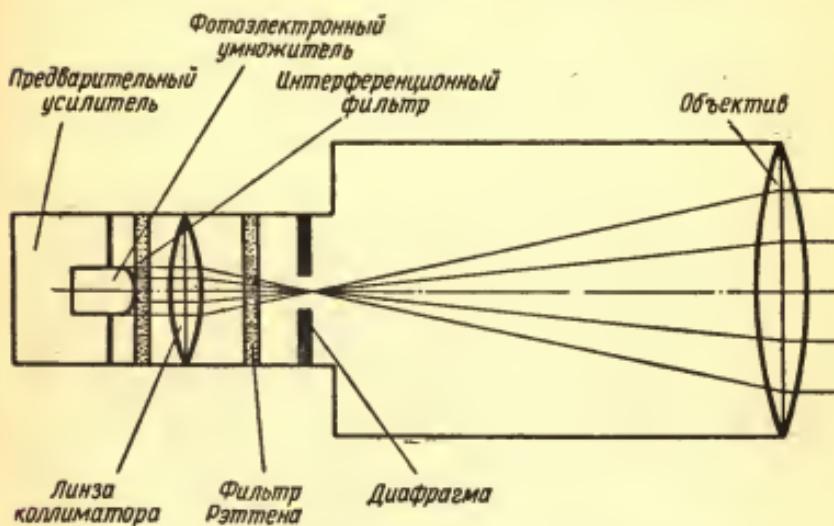


Рис. 4.6. Схема приемной части оптического дальномера.

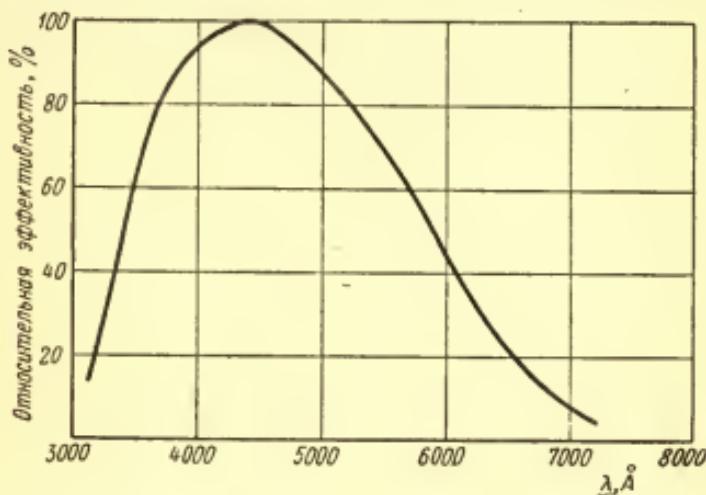


Рис. 4.7. Спектральная характеристика чувствительного элемента.

значительно уменьшаются флюктуации с большой интенсивностью. При этом передний фронт импульса резко очерчен, что увеличивает точность измерений.

Общий вид первого экспериментального дальномера приведен на рис. 4.9. С помощью этой установки изменилась дальность на расстояниях до 3000 м при полной дневной освещенности и до 11 200 м ночью. В качестве цели использовалась стена промышленного здания.

Анализ полученных результатов [4] позволил сделать некоторые выводы, которые легли в основу создания

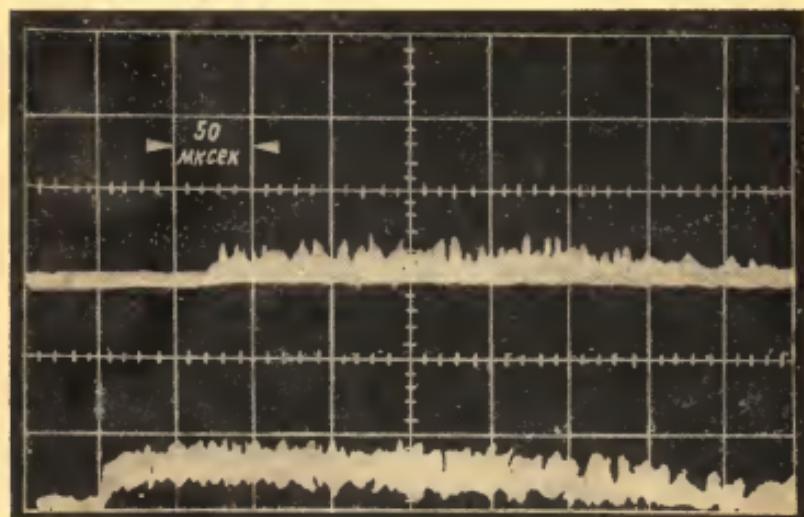


Рис. 4.8. Выходной сигнал ОКГ.

более совершенной аппаратуры. В основу расчета дальности была положена методика, используемая в радиолокации. Поскольку различимость объекта зависит от соотношения сигнал/шум на входе приемника, то были проанализированы возможные шумы в данной системе. Эти шумы возникают как в самом приемнике, так и вне его. Они представляют собой беспорядочные колебания, образовавшиеся в результате случайных процессов. Флюктуации сигнала на экране осциллографа, вызванные шумами, ограничивают максимальную дальность действия прибора. Величина флюктуации зависит от основных физических процессов, и именно она ограничивает пороговую чувствительность данного типа прибора. Основные флюктуации вызываются шумами, которые накладываются на полезный сигнал как в самом приемнике, так и в приемной антенне.

нике, так и вне его [27, 28]. Характерны три категории шумов.

*Шум темнового тока*, возникающий в ФЭУ, к катоду которого всегда приложено напряжение. Это приводит к тому, что по катоду течет ток даже при отсутствии падающего на него света, что, в свою очередь, приводит к появлению шума, мощность которого пропорциональна квадрату силы тока.

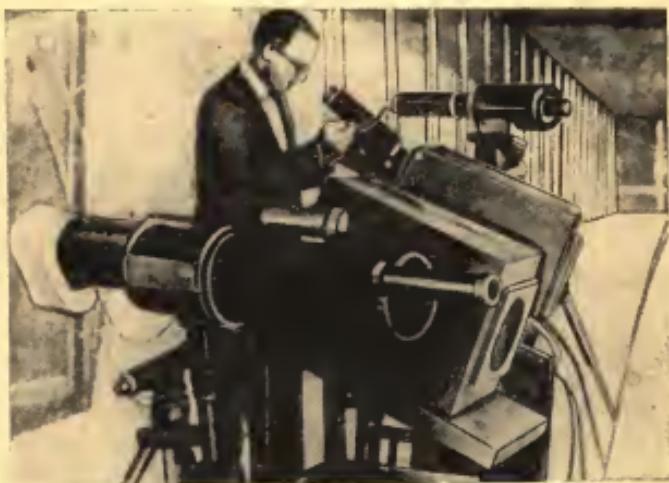


Рис. 4.9. Внешний вид первой экспериментальной дальномерной установки, использующей ОКГ на рубине.

*Дробовый шум*, зависящий от общей освещенности и вызванный случайными процессами в приемнике.

*Внешний шум*, возникающий в результате изменения освещенности объектов под действием посторонних источников света и флюктуации их потока, а также рассения пучка света от оптического генератора на объектах, не являющихся целями.

Уменьшение этих шумов и улучшение системы может быть выполнено следующими способами:

- получением более высокой световой отдачи и более приемлемой формы выходного сигнала за счет охлаждения ФЭУ, что не было сделано в первой конструкции прибора;

- повышением чувствительности и подавлением шумов в результате применения ФЭУ с более высокой кван-

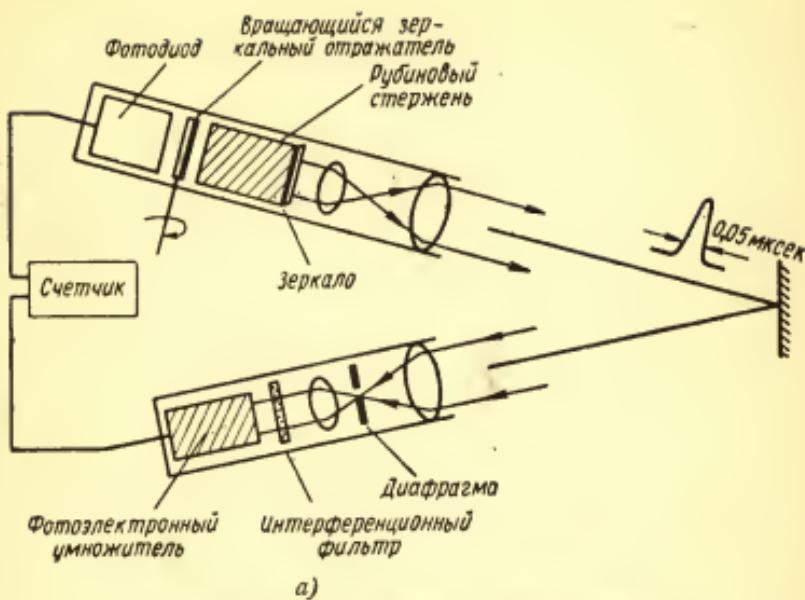
товой эффективностью на частоте выходного сигнала. Дальность действия системы в ясную погоду при ярком солнечном освещении ограничивалась шумом дробового эффекта. Одной из причин, объясняющих высокий уровень шума дробового эффекта, является малая квантовая эффективность ФЭУ на данной длине волны (квантовая эффективность показывает отношение количества выбитых с катода электронов к числу квантов света, упавших на катод). Квантовая эффективность используемого ФЭУ составляла 0,01. При значении квантовой эффективности 0,1 отношение сигнал/шум возрастает в три раза и увеличивается дальность действия прибора;

— повышением избирательности путем применения еще более узкополосного спектрального фильтра или, что еще лучше, оптического гетеродинирования. Повышение избирательности системы в этом случае также необходимо, хотя в системе и стоит фильтр с полосой пропускания 20  $\text{\AA}$ . Но поскольку излучение оптического генератора на порядок уже по спектру, то необходимо применять и фильтр соответствующей ширины. Это позволит устраниТЬ большую часть излучения, создаваемого пространственными источниками.

Однако спектральная фильтрация не может исключить интерференцию светового сигнала, рассеянного в атмосфере вдоль пути его распространения. Если изменение дальности осуществляется не коротким одиночным импульсом, а нерегулярной последовательностью импульсов, длящейся несколько микросекунд, то атмосферное рассеяние может оказаться опасным источником шума. Поэтому необходимо укоротить импульс передатчика. Это возможно сделать либо используя ячейку Керра, либо быстро прекращая возбуждение.

Техническая реализация высказанных соображений в последующих разработках приборов позволила значительно улучшить их характеристики.

Несколько улучшенный вариант дальномера (рис. 4.10), в котором для формирования мощных одиночных коротких импульсов используется вращающееся зеркало, был разработан Корпусом связи США. Передающая часть такого оптического дальномера содержит рубиновый стержень, установленный между двумя внешними зеркалами, одно из которых вращается с большой



а)



б)

Рис. 4.10. Схема (а) и внешний вид (б) оптического дальномера Корпуса связи армии США.

угловой скоростью. Зеркала параллельны друг другу только в течение очень короткого промежутка времени. Зажигание импульсной лампы строго синхронизовано с вращением отражателя, чтобы обеспечить вспышку точно в момент параллельного положения зеркал.

Скорость вращения зеркального отражателя составляла 6000 об/мин. В экспериментальном дальномере, который питался целиком от батарей, излучаемый импульс запускал, а отраженный импульс останавливал счетчик времени интервалов. Измеренное расстояние до цели указывалось на индикаторе непосредственно в цифровом отсчете.

Магнитный датчик, установленный на оси вращающегося зеркала, определял относительное положение его в любой момент времени. Механический датчик через заданные промежутки времени посыпал хронирующий импульс, который и включал в работу поджигающее устройство, обеспечивающее начало работы прибора.

Максимальная импульсная мощность, получаемая при работе оптического генератора в режиме одиночных импульсов при использовании экспериментальной системы с вращающимся зеркалом, составляла 3 Мвт. Длительность импульса, измеренная по уровню 0,5, составляла 0,05 мксек.

В некоторых образцах дальномеров для получения мощных импульсов путем скачкообразного изменения добротности применяется схема с вращающейся призмой или же используется метод расстроенной призмы, позволяющий избежать применения вращающихся элементов. Во втором случае рядом с одной из призм находится полупрозрачная пластина, перемещением которой меняют отражающие свойства первой призмы, т. е. меняют добротность объемного резонатора. Это устройство обеспечивает получение достаточно мощного импульса.

Рабочие характеристики таких дальномеров, выпускаемых серийно, следующие.

Дальность . . . . .	8 км
Точность отсчета дальности . . . . .	6 м
Частота повторения импульсов . . . . .	6 имп/сек
Мощность в импульсе . . . . .	0,1—1,0 Мвт
Вес . . . . .	12 кг
Объем . . . . .	32 дм <sup>3</sup>

Другой образец оптико-электронного дальномера, разработанного фирмой Martin, предназначается для определения положения танков и артиллерии на поле боя и может быть использован совместно с огневыми средствами. Дальномер укреплен на треножнике и может легко переноситься одним солдатом-оператором. Для определения расстояния оператор нацеливается на объект и нажимает кнопку, в результате чего на цель направляется узкий луч света, генерируемый оптическим генератором на рубине. Расстояние до цели, определяемое с большой точностью, фиксируется на индикаторной панели прибора в виде цифровых данных. Через год дальномер предполагают передать в массовое производство. Импульсная мощность генератора, используемого в этом приборе, равна 100 квт. На дальности действия до 10 км отсчет дальности производится с точностью до 10 м. Вес прибора — около 18 кг [7].

Был предложен также корреляционный дальномер, который может обеспечить повышенную точность измерений [8]. Известно, что световой импульс оптического квантового генератора состоит из множества случайных всплесков длительностью около  $10^{-5}$ — $10^{-7}$  сек. Неопределенность в соотношении между пиками не позволяет определить единственное значение фазы для обнаружения, если не используется один или несколько индивидуальных пиков. В корреляционном дальномере осуществляется задержка передаваемого сигнала и его сравнение с сигналом, отраженным от цели. Для смешения сигналов используются фоточувствительные элементы, на которые проектируются дифракционные отметки от двух щелей. Через одну щель проектируется задержанная часть сигнала, через другую — отраженный от цели сигнал. Фоточувствительный элемент представляет собой мозаику с несколькими сегментами. Такой чувствительный элемент позволяет определить не только дальность до цели, но и направление перемещения цели.

Одной из трудностей разработки такого дальномера является создание линии задержки с малыми потерями. Потери в этой линии играют главную роль в ограничении дальности действия системы.

Работы по созданию лабораторных и экспериментальных образцов позволили оценить достоинства и недостатки различных вариантов оптических квантовых

дальномеров и перейти к созданию опытных и серийных образцов этих приборов. Один из таких дальномеров, предназначенный для оснащения войск стран НАТО, прошел в марте 1963 г. испытания и показал хорошие тактико-технические характеристики (табл. 4.3).

Этот дальномер может переноситься одним оператором, поскольку вес его составляет около 20 кг. Конструктивно он состоит из двух блоков, один из которых переносится оператором на руках (вес его около 6 кг), второй переносится за плечами (вес его около 13 кг).

Первый блок выполнен в виде двухствольного ружья со стволами диаметром 50 мм. В одном из стволов размещен оптический квантовый генератор, в другом — приемное устройство с фотоэлектронным умножителем в качестве чувствительного элемента. Между стволами расположен оптический прицел, представляющий собой телескопическую систему с 9-кратным увеличением и переменным фокусным расстоянием.

Второй блок выполнен в виде контейнера, в котором размещены источник питания, преобразователи напряжения, конденсаторы, электронное вычислительное устройство дальности и газоразрядные цифровые индикаторные лампы, показывающие величину дальности до цели.

Чтобы определить дальность до цели, оператор при помощи оптического прицела наводит приемо-передающее устройство на цель и, нажимая на спусковой курок,

Таблица 4.3

Основные характеристики	Номиналы	Примечания
Излучаемая длина волны	6943 Å	
Мощность в импульсе	1 Мвт	
Частота посылок	3 имп/мин	
Ширина луча	0,5 угл. мин	Может быть уменьшена в 3—4 раза
Длительность нормальной работы батарей	100 импульсов	Без подзарядки
Дальность действия	11 км	При дожде — 4 км
Разрешающая способность		
по дальности	±5 м	
по углу	1,9—2,7 м	
Вес прибора	11 кг	На дальности 10 км При серийном выпуске

включает в работу оптический квантовый генератор. Отраженный от цели сигнал улавливается приемным устройством и поступает в устройство отсчета времени, в котором определяется временной интервал между опорным и отраженным сигналом. Полученная информация о дальности указывается в цифровой форме.

## 5. УСТАНОВКИ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Вторая мировая война способствовала развитию средств оптической связи. Это было вызвано тем, что в условиях ведения маневренных операций на суше и на море очень большое значение имеет скорость передачи информации при сохранении секретности переговоров. Радиосвязь в некоторых случаях не обеспечивает этих требований, поскольку передача информации может быть легко перехвачена, а место передачи информации запеленговано.

В системах связи иногда идут даже на ограничение дальности действия для обеспечения полной скрытности и помехозащищенности. Средства радиосвязи таким требованиям также удовлетворяют плохо. В этом случае используются оптические телефоны. Такие средства связи с успехом могут использоваться в гористой местности, для связи через водные преграды, для связи между подвижными объектами [32, 31].

Все это привело к широким исследованиям по созданию мощных источников света, удобных для модуляции, с целью использования их в качестве источников излучения в оптических телефонах. Оказалось, что стандартные лампы накаливания для этой цели не подходят, поскольку они очень инерционны. Были разработаны цезиевые и циркониевые лампы мощностью 2—100 вт и ртутные лампы с мощностью излучения до 2 квт. На основе этих источников света были созданы образцы военной связной аппаратуры [33], не отличающейся совершенством.

Применение же в качестве источников излучения в системах связи оптических квантовых генераторов позволяет создать чрезвычайно помехозащищенную аппаратуру и передавать огромное количество информации по одному каналу [44].

На рис. 4.11 приведена структурная схема системы связи для работы в оптическом диапазоне. Она аналогична схемам обычных радиосистем и состоит из передатчика и приемника, разделенных между собой средой, в которой распространяется излучение. Основные



Рис. 4.11. Структурная схема системы связи для работы в оптическом диапазоне.

блоки системы показаны сплошными линиями, а вспомогательные — пунктирными. Связи между блоками, осуществляемые пучками лучей, обозначены широкими линиями, электрические соединения обозначены узкими сплошными линиями.

Из блоков, включенных в передатчик, выше не был рассмотрен только источник информации. Этот источник может быть либо одного из распространенных типов, либо принципиально новым. Модуляцию можно применить как внутреннюю (A), так и внешнюю (B). Модуляторы A и B взаимно исключают друг друга, но нали-

чие одного из них обязательно. В системе связи, использующей квантовый генератор, большое значение имеет направлениость излучения и приема, поэтому для точного нацеливания передатчика на приемник необходимо специальное прицельное устройство.

Основными блоками приемника является приемный коллектор, фильтр, усилитель несущей частоты и детектор. Фильтр необходим для борьбы с широкополосными помехами, однако при наличии усилителя несущей частоты эти функции могут выполняться и усилителем. Наиболее целесообразной является супергетеродинная схема приемника, для которой требуется местный гетеродин и второй детектор. Усилитель в полосе частот информации необходим в том случае, если усиление не происходит в блоке УПЧ или в оконечном устройстве использования информации.

Было разработано несколько оптических связных систем. В одной из них применялся квантовый генератор на рубине [11]. Для модуляции излучения генератора использовался кристалл кислой фосфориокислой соли натрия, смонтированный между двумя массивными алюминиевыми конусами, являющимися частью сдвоенного объемного резонатора проходного типа, настроенного на частоту 200  $M\text{гц}$ . Конус используется также для отвода тепла и канализации энергии от модулятора. Излучение, подлежащее модуляции, входит и выходит из резонатора через полые конусы. Для приема излучений используется обычный телескоп с диафрагмой, ограничивающей поле зрения до 3  $мрад$ . Изображение удаленного передатчика фокусируется на фотокатоде фотозлектронного умножителя. При экспериментах по выяснению возможности широкополосной наземной связи выяснилось также влияние дождя и условий распространения излучения вдоль поверхности земли. Установка для оптической связи потребляет мощность 350  $вт$  и обеспечивает дальность действия 18 500  $м$ . Мощность излучения составляет 0,1  $вт$ , ширина луча — 1  $мрад$ . Фотография установки приведена на рис. 4.12.

Другая установка для связи в оптическом диапазоне [33, 34] (рис. 4.13) представляла собой укрепленные на единой платформе оптический генератор на рубине и телескопическую трубку. Генератором индуцировались импульсы длительностью 0,5  $мсек$ , которые были про-

модулированы несколькими сотнями импульсов. С помощью оптической системы обеспечивалось сужение луча до величины  $0,1^\circ$ , что обеспечивало на расстоянии 40 км освещенный круг диаметром около 60 м, ясно видимый невооруженным глазом. Принимаемое излучение регистрировалось с помощью фотоэлектронного умножителя и индикатора.



Рис. 4.12. Установка для оптической связи.

Все сказанное позволяет сделать вывод, что для создания систем связи, основанных на использовании оптического диапазона, уже имеется аппаратура, хотя и недостаточно хорошо отработанная [9]. Однако реальный переход на оптический диапазон частот, особенно с использованием каналов с очень широкой полосой и получением максимальной эффективности на всех несущих частотах, требует известных усилий в разработке необходимой аппаратуры.

За рубежом работы по созданию военных образцов систем связи развернулись в двух направлениях: по созданию аппаратуры на основе имеющихся технических достижений и по проведению исследовательских работ, направленных на создание новых модуляционных и приемных устройств, удовлетворяющих требованиям оптического диапазона.

Хорошие результаты в оптической связи были достигнуты при использовании полупроводниковых оптиче-



Рис. 4.13. Передающее устройство с ОКГ на рубине, используемое в экспериментах по оптической связи.

ских генераторов. Так, в создании экспериментальной телефонной установки для связи на инфракрасных лучах применялся диод из арсенида галлия, который излучал на волю 0,895 мк. Мощность излучения составляла 72 мквт при мощности возбуждения 0,24 вт, ширина луча — 6°, питание прибора осуществлялось от ртутной батареи, дальность действия установки составляла 60 м [21].

Новая усовершенствованная установка с дальностью действия 6,6 км имеет перестраиваемую ширину луча. Поиск корреспондента производится лучом также шириной 6°. После отыскания корреспондента ширина луча уменьшается до 1°. Габаритные размеры установки 38×63×88 мм<sup>3</sup> [46].

Были проведены эксперименты по передаче телевизионных сигналов с помощью диода из арсенида галлия [45]. На рис. 4.14 показана блок-схема видеопередатчика (а) и приемника (б), которые находились на

расстоянии 64 м друг от друга. Видеосигналы снимались с блока настройки телевизора либо с передающей трубы и подавались на специально разработанный видеоусилитель раскачки, который модулировал ток через диод, достигавший 500 мА. Инфракрасное излучение направлялось на приемное устройство с параболическим зеркалом диаметром 30 см, в фокусе которого располагался фотоэлектронный умножитель.

Выходной сигнал с ФЭУ подавался на видеоусилитель, а с него на видеоконтрольное устройство. Диод

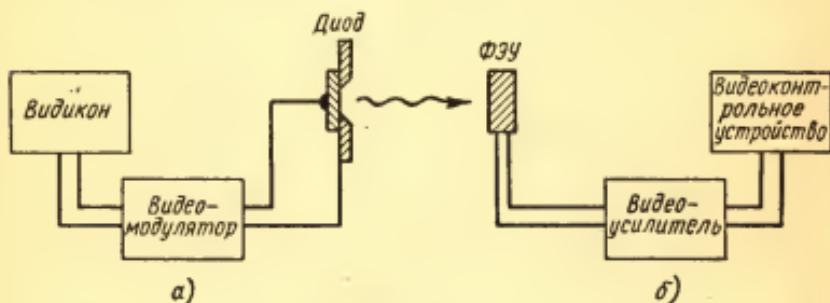


Рис. 4.14. Блок-схема приемо-передающей телевизионной системы с использованием полупроводникового диода в качестве передатчика.

работал при комнатной температуре, вследствие чего его выходная мощность была в 500 раз меньше, чем при температуре 77° К. Качество изображения было такое же хорошее, как и при обычной телевизионной передаче. Поскольку излучение на волне 0,85 мк, на которой велась передача, лежит в одном из окон прозрачности атмосферы, то возможна передача телевизионных сигналов на расстоянии до 50 км.

Кроме того, возможны следующие применения оптических генераторов на полупроводниках:

- скрытая наземная связь на близком расстоянии,
- передача телевизионных изображений из космоса,
- связь через плазму, окружающую ракету при входлении ее в атмосферу,
- космическая связь.

Оптический квантовый генератор на полупроводнике, дающий когерентное излучение, особенно перспективен в оптической локации и связи, а диоды, дающие некогерентное излучение, могут быть использованы в элек-

тронных вычислительных машинах для считывания информации с ленты и карточек, в самолетной аппаратуре для предотвращения столкновений, а также для построения быстродействующих логических схем в ЭВМ путем сочетания диодного оптического генератора с фотодетектором. Подобный прибор был изготовлен фирмой Texas Instruments и обеспечивал значительное усиление по мощности [50, 51].

В последнее время оптические генераторы на полупроводниках стали использовать в качестве источников возбуждения для оптических генераторов с активным веществом стержневого типа для повышения их к. п. д. [47, 48, 49]. Использование полупроводниковых диодов для возбуждения оптического генератора на рубине может повысить к. п. д. от 1 до 10% [48], для возбуждения генератора на фтористом кальции с примесью диспрозия — на 40—50%, а для возбуждения генератора на вольфрамате кальция с примесью неодимия — на 85% [47].

Повышение к. п. д. вызвано тем, что полупроводниковые генераторы света имеют выходную энергию, сосредоточенную в относительно узкой линии поглощения активного вещества основного оптического генератора. В первых экспериментах в качестве активного вещества использовали кристалл флюорита кальция с примесью диспрозия, который помещали в сосуд с жидким азотом и облучали полупроводниковым диодом из арсенида галлия. Ионы диспрозия поглощали излучение диода на волне 9000 Å и излучали колебания на волне 23 000 Å.

Использовался в качестве активного вещества и вольфрамат кальция с примесью неодимия. Рабочая температура диодов на чистом арсениде галлия поддерживалась равной 200° К, для диодов на галлий-индий-арсениде — 77° К. Для уменьшения потерь энергии предпринимаются попытки разработать простую геометрическую конструкцию соединения источника возбуждения на диоде с активным веществом основного оптического генератора.

## 6. ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ В СИСТЕМАХ ПОДВОДНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И СВЯЗИ

Значительное внимание в иностранной печати уделяется вопросу применения оптических квантовых приборов для решения задач подводного обнаружения и

подводной связи, поскольку обнаружение подводных лодок в погруженному состоянии и особенно установление связи между ними представляет значительные трудности. Акустические средства, используемые для обнаружения лодок по шуму винтов, обладают рядом существенных недостатков, одним из которых является невозможность произвести селекцию и выделить истинную цель среди посторонних. В связи с этим большое внимание уделялось исследованию возможностей применения для этих целей оптических средств обнаружения и связи, основанных на квантовых приборах [1, 25, 36].

В статье «Заменит ли оптический квантовый генератор ультразвуковой гидролокатор?», опубликованной в США [15], рассматриваются недостатки акустических средств и перспективы использования оптических средств для решения задач подводного обнаружения и связи.

Считают, что применение узкого сканирующего луча позволит создать эффективную систему подводного обнаружения, а направленная связь на оптических длинах волн будет отличаться большой скрытностью.

При значительной финансовой поддержке Военно-морского ведомства США были развернуты исследования и разработки приборов для подводного применения. Эти исследования пошли по двум основным направлениям. Первое направление предусматривало изучение пропускания оптического излучения морской водой, второе — создание образцов аппаратуры для обнаружения и связи на основе оптических квантовых генераторов.

Результаты исследования прозрачности морской воды показали, что поглощение излучения определяется в основном поглощением в веществах, растворенных в воде, и рассеянием излучения на взвешенных частицах. В зависимости от состояния воды либо поглощение, либо рассеяние играет решающую роль. Вместе с тем было показано, что вода, так же, как и атмосфера, обладает различной спектральной прозрачностью. В частности, было показано, что излучение в красной части спектра (т. е. излучение рубинового квантового генератора) значительно поглощается морской водой, а излучение в сине-зеленой части спектра распространяется на значительные расстояния.

Следовательно, применение квантовых генераторов на рубине нецелесообразно и необходимо найти новые

активные вещества, излучение которых лежало бы в сине-зеленой области. Так, например, Центром лазерных систем был разработан мощный источник когерентного зеленого света [58, 59].

Прибор для получения зеленого света имел в своем составе оптический квантовый генератор и устройство для получения дополнительных гармоник.

Основным элементом этого устройства является кристалл, обладающий нелинейными свойствами, который изготавливается либо из первичного кислого фосфата калия, либо из первичного кислого фосфата аммония.

Излучение генератора направляется на кристалл, который выделяет благодаря своим нелинейным свойствам вторую гармонику от излучения генератора. Длина волны этого излучения составляет  $5300\text{ \AA}$  при спектральной ширине полосы около  $2\text{ \AA}$ . После кристалла расходимость «пучка» лучей составляет 1 мрад, а мощность излучения превышает 10 кват. За счет повышения к. п. д. прибора предполагается повысить мощность излучения до нескольких мегаватт.

По данным зарубежной печати исследования в области отыскания новых материалов, излучение которых лежит в зеленой и даже ультрафиолетовой части спектра, также увенчались успехом. Были получены два материала (химический состав которых фирма держит в строгом секрете, хотя и выпустила в продажу данный материал), которые генерируют в зеленой части спектра. Имеются сведения, что данный материал легирован тербием.

Излучение с длиной волны  $2896\text{ \AA}$  было получено от газового оптического квантового генератора, работающего на смеси аргона и углекислого газа.

Исследовательской лабораторией ВМФ США проведены эксперименты по получению излучения от силикатного стекла с примесью гадолиния. Возбуждение производилось с помощью ксеноновой лампы, большая часть энергии излучения которой сосредоточена в диапазоне  $2700$ — $2800\text{ \AA}$ . Излучение наблюдалось на волне  $0,3125\text{ мк}$  и занимало полосу  $55\text{ \AA}$ .

В основу первого образца подводного оптико-электронного локатора на основе квантового генератора была положена обычная схема с разверткой изображения. Аппаратура состоит из передающей, приемной и регистрирующей частей. В передающей части в качестве источника излучения применяется оптический квантовый генератор, узкий луч которого с помощью сканирующего устройства освещает определенное поле обзора. В приемной части имеется узкополосная оптическая система, которая сканирует синхронно с лучом квантового генератора. Отраженное целью или фоном излучение передатчика фокусируется оптической системой на чувствительном элементе (ФЭУ). В регистрирующей части строится изображение просматриваемого района.

Для уменьшения влияния фона в оптической системе приемной части используется узкополосный фильтр, спектральная ширина которого менее  $1\text{ \AA}$ .

Возможно, такая установка будет обладать высокой разрешающей способностью (выше, чем разрешающая способность подводной телевизионной аппаратуры) и будет иметь дальность действия несколько километров, в то время как дальность подводной телевизионной установки составляет примерно  $140\text{ м}$ .

В настоящее время заканчивается разработка оптического квантового генератора с активным веществом, излучение которого лежит в сине-зеленой области спектра [60].

Разработана система связи для подводных лодок на основе оптического генератора. Действие системы основано на передаче информации из перископа одной подводной лодки в перископ другой лодки с помощью инфракрасного луча [17].

Кроме возможностей применения оптических генераторов для связи и обнаружения, предполагается применение их для обнаружения подводных мин без риска срабатывания взрывателей, реагирующих на работу гидролокаторов, а также для наведения торпед и других безэкипажных подводных устройств [52].

В случае, если подводная лодка терпит крушение, то находящиеся в открытом море моряки будут использовать для указания своего местоположения миниатюрный ОКГ, вес которого не превышает  $40\text{ г}$ , а размеры вместе с аккумулятором составляют  $5 \times 10 \times 10\text{ см}$  [72].

## 7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Поскольку при ведении современных боевых операций для принятия оптимального решения необходимо проанализировать возможно большее число вариантов в возможно короткий срок, в армии широко используют электронные вычислительные машины (ЭВМ). К вычислительным машинам предъявляется два основных требования: малогабаритность и быстродействие.

В связи с появлением квантовых приборов стало возможным создание оптических сверхбыстродействующих вычислительных машин (ОВМ) [1, 20]. Основным элементом такой вычислительной машины является запоминающая ячейка, построенная на миниатюрном оптическом квантовом усилителе. Этот усилитель позволяет записать информацию в двоичной системе (нуль-единица). Нуль соответствует основному состоянию активного вещества, единица — возбужденному. Когда на активное вещество падает световой управляющий сигнал, то, если оно находится в возбужденном состоянии, излучается усиленный сигнал.

При падении того же сигнала на невозбужденное активное вещество сигнала на выходе не наблюдается. Вследствие высокой скорости перехода возбужденных частиц из одного энергетического состояния в другое такую вычислительную ячейку на основе оптического квантового усилителя можно переключать из положения «нуль» в положение «единица»  $10^9$  раз/сек [53]. Машины на основе таких ячеек по быстродействию превосходят все вычислительные устройства, в которых информация передается по проводам или микроволновым волноводным линиям. Световоды передают информацию, которая не содержит шумов и наведенных сигналов.

Оптические вычислительные машины, работающие в диапазоне  $1000$  Мгц, основаны на применении генераторов на волоконной оптике. Волокна, являющиеся вместе с тем активными линиями, работают аналогично линиям на нейристорах. Возможна также направленная передача световых импульсов при близком размещении оптических волокон. Это означает, что могут быть построены логические схемы на квантовых генераторах [18].

Изучение, проводившееся специалистами ВВС США, показало, что такие требования, предъявляемые

к ЭЦВМ, как необходимый порог усиления сигнала, обеспечение контроля или задержки импульса, а также стандартизация амплитуды импульса, выполняются элементами на квантовых приборах.

В ноябре 1962 г. состоялся симпозиум по оптической обработке информации, на котором было отмечено, что оптические сверхбыстро действующие вычислительные машины на основе квантовых приборов могут быть построены в ближайшее время [18].

Основная проблема, по мнению разработчиков, состоит в том, чтобы изучить необходимую комбинацию излучающих и поглощающих ионов в волоконных линиях, а также получить достаточно высокие частоты возбуждения, необходимые для обеспечения тактовых частот порядка 1 Гц при малой длине волокон.

Для тактовых частот такого порядка с помощью волоконных линий диаметром 1 мк можно обеспечить канализацию излучений средней мощности приблизительно 10 мвт при продолжительности флюoresценции 0,4 мсек и длительности импульсов 0,1 нсек.

Изучение типов волн в стеклянных волокнах показало наличие такой же разницы фазовых скоростей распространения различных типов волн, как и в диэлектрических волноводах. Существует также оптическая связь между близкими волокнами. Установлено, что при передаче излучения одного оптического квантового генератора на основе стекла с неодимием в другой излучение первого генератора уменьшает степень инверсии населенности уровней второго генератора, что вызывает прекращение колебаний. Это дает возможность создать логические схемы типа «нет — или». Кроме того, оптические генераторы на стекле могут быть использованы как усилители.

Изучение методов быстрого отклонения световых лучей показало, что для адресных ячеек памяти, схем многоканального переключения и индикаторных устройств можно получить скорости отклонения порядка 1 Мгц.

Ожидается, что новые материалы для оптического квантового генератора обеспечат возможность отклонения светового потока в пределах значительных углов, оставляя угловой раствор луча прежним, т. е. сохраняя высокую разрешающую способность.

Материал, который применяется для создания световодов, имеет очень малую толщину и малые потери на единицу длины. В жгуте, сечение которого составляет  $10 \text{ мк}$ , укладывается до 100 оптических световодов. Потери в пассивном оптическом световоде составляют  $1,1 \text{ дБ/м}$ , в то время как специальный коаксиальный кабель, используемый в диапазоне на  $1 \text{ ГГц}$ , имеет потери  $1,8 \text{ дБ/м}$ .

Оптические волокна с присадками редких элементов, приобретая способность усиливать проходящий сигнал, позволяют скомпенсировать любые потери энергии проходящего сигнала. Спектральный диапазон известных в настоящее время элементов оптических вычислительных машин лежит в пределах от 4000 до 20 000  $\text{\AA}$  [54].

## 8. НАЗЕМНАЯ ПОЛУАКТИВНАЯ СИСТЕМА НАВЕДЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ПРИБОРАХ

Для управления полетом реактивного снаряда от момента его запуска до встречи с целью используется один из методов самонаведения, называемый полуактивным. Сущность этого метода заключается в том, что цель (танк, корабль и т. п.) облучается энергией источника, установленного вне реактивного снаряда.

Снаряд после запуска программным устройством вводится в луч, который оператор удерживает на цели в тече-

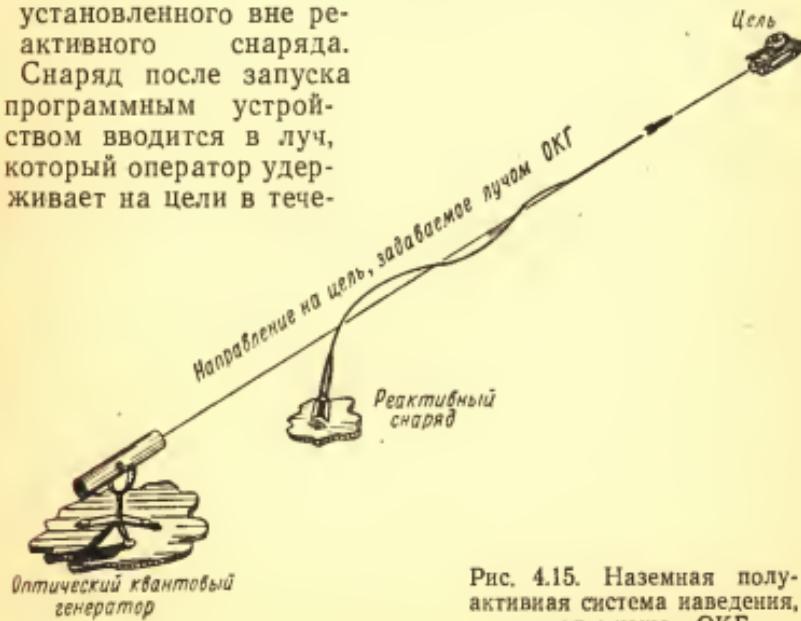


Рис. 4.15. Наземная полуактивная система наведения, использующая ОКГ.

ние всего периода наведения. На самом снаряде имеется координатор, который определяет положение снаряда относительно луча и вырабатывает управляющие сигналы при появлении рассогласования между траекторией полета и направлением на цель. После встречи снаряда с целью источник излучений может быть использован для наведения других снарядов (рис. 4.15).

Система подобного типа, использующая в качестве источника излучения оптический квантовый генератор, разрабатывается с целью замены системы управления противотанковым снарядом типа Schillelagh. Основным достоинством такой системы наведения является то, что она может быть сделана помехозащищенной. Кроме того, возможность получения чрезвычайно узкого луча обеспечит повышенную точность наведения [1].

## 9. УКАЗАТЕЛЬ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГАЗОВОГО ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Газовые оптические квантовые генераторы используются в качестве датчиков угловой скорости вращения (оптических гироскопов). Были предложены два макета [22, 23]. В первом макете используются четыре газовых оптических генератора непрерывного излучения на гелий и неоне, которые расположены по сторонам квадрата, образуя замкнутый резонатор (рис. 4.16). В каждом из четырех углов под углом  $45^\circ$  располагается зеркало. Излучение каждого генератора направляется таким образом в соседний генератор. Так как каждый генератор излучает в двух направлениях, то по кольцу циркулируют два потока электромагнитной энергии, движущихся в противоположных направлениях. Пока система остается неподвижной относительно оси вращения, оба потока проходят одинаковые расстояния. При вращении системы один из потоков проходит меньший путь, чем другой и в результате возникает сдвиг частот. Частота луча, проходящего больший путь, уменьшается, а частота другого луча увеличивается.

Образовавшийся сдвиг частот измеряется оптическим методом, для чего одно из четырех угловых зеркал делается полупрозрачным, а смешение двух встречных потоков на фотодетекторе производится с помощью вспомогательного зеркала. В результате смешения этих

потоков создаются биения на звуковой частоте, которая равна двойному сдвигу. Эта частота прямо пропорциональна угловой скорости вращения системы и оптической длине каждого плеча рамки и обратно пропорциональна длине волны, излучаемой оптическим квантовым генератором.

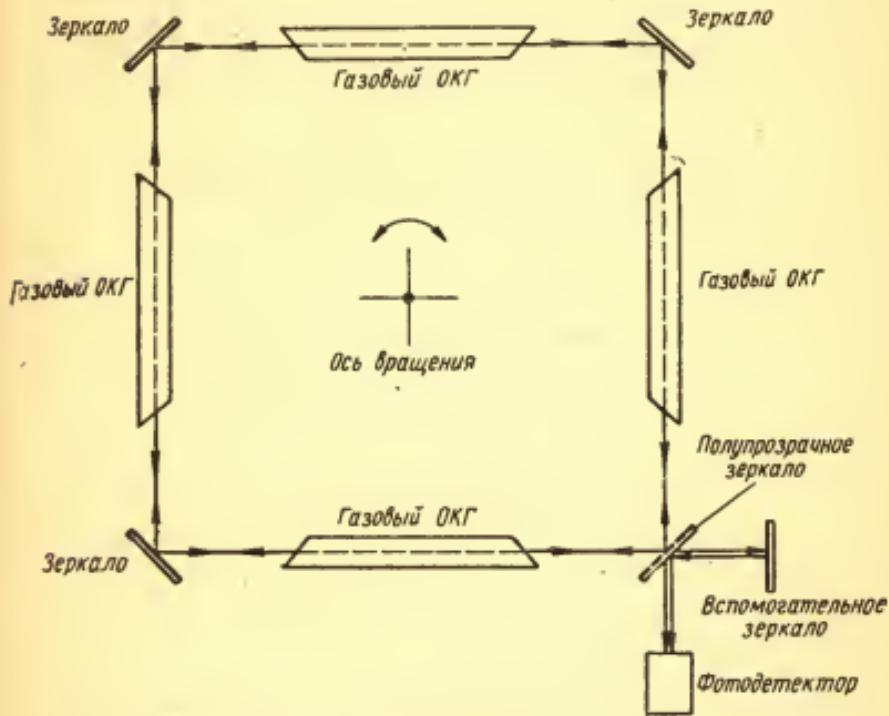


Рис. 4.16. Схематическое изображение макета оптического гироскопа.

В первом макете гироскопа оптическая длина плеча составляет 1 м, длина волны — 1,153 мк. Это обеспечивает на выходе детектора сигнал разностной частоты 250 гц при скорости вращения 1 град/мин [55]. На рис. 4.17 приведены полученные экспериментально и теоретически зависимости между скоростью вращения системы и частотой биений, которые хорошо соглашаются.

Был изготовлен также экспериментальный «оптический гироскоп», в котором используются три оптических генератора, образующие равносторонний треугольный

резонатор с зеркалами, расположенными на расстоянии 138,56 см друг от друга. Генераторы работают на волне 6328 Å. По мнению разработчиков, использование треугольного резонатора упрощает настройку прибора, обеспечивает большую добротность и позволяет свести к минимуму оптические аберрации. Гироскоп способен измерять угловые скорости менее 0,001 град/час. Такая система может быть использована в качестве очень точного эталона углового положения относительно инер-

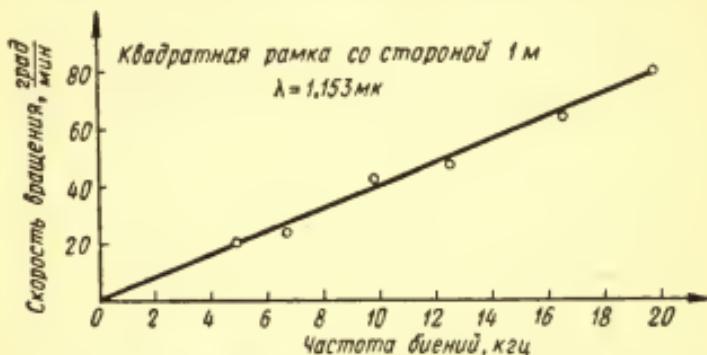


Рис. 4.17. Зависимость между угловой скоростью вращения оптического гироскопа и частотой биения выходного сигнала.

циального пространства. При этом можно получить разрешающую способность менее 0,25 угл. сек и дрейф менее 5 угл. сек в сутки.

Предполагается, что к концу 1965 г. удастся создать газовый оптический гироскоп весом менее 0,9 кг, занимающий объем менее 0,5 дм<sup>3</sup> и работающий при выходной мощности порядка 10 вт.

Для уменьшения размеров оптических гироскопов имеются два пути: использование активных веществ, излучающих более короткие длины волн, и применение спиральной конструкции световодов. Однако и гироскопы с большой длиной пути могут найти применение на подводных лодках и надводных кораблях, где размеры гироскопа не играют существенной роли.

Поскольку оптический гироскоп не имеет движущихся частей, то он должен обладать длительным сроком службы. Положительным качеством такого гироскопа является также то, что его выходной сигнал может быть

выражен в цифровой форме, что удобно для использования его совместно с ЭЦВМ системы управления.

Создан новый вариант оптического гироскопа, в конструкции которого применяется только один оптический квантовый генератор, который является стороной квадрата, в углах которого расположены зеркала. Это позволило упростить конструкцию и уменьшить стоимость прибора. Чувствительность последнего варианта прибора составляет 0,5 град/мин [55].

## 10. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В КАЧЕСТВЕ РАДИАЦИОННОГО ОРУЖИЯ

В связи с высокими плотностями энергии (до  $10^{17} \text{ вт/см}^2$ ), полученными при фокусировании излучения оптического квантового генератора, в США развернулись работы по созданию радиационного оружия, получившего сокращенное название DEW (Directed Energy Weapons). Однако сообщения о проводимых в США разработках этого оружия появляются редко из-за секретности этих работ. Такое оружие предполагают использовать для поражения живой силы и техники [12, 29, 30].

По времени воздействия DEW подразделяются на оружие мгновенного и замедленного действия. Для борьбы с живой силой в основном предполагается применять оружие мгновенного действия, длительность воздействия которого составляет несколько наносекунд. Наиболее подходящими для создания радиационного оружия считаются генераторы импульсного действия, поскольку с их помощью может быть получена значительная плотность энергии.

Такое оружие может быть создано и в виде пистолета. В качестве источника излучения предполагается использовать оптический генератор на рубине. Источник возбуждения изготавливается в виде патрона, который легко можно заменить после его использования. Рубиновый стержень расположен вдоль оси патрона и окружен химическими источниками возбуждения, питаемыми от батареи. Внешний вид такого оружия и съемный патрон к нему показаны на рис. 4.18.

По сообщениям зарубежной печати, бесшумность действия этого оружия обеспечивает скрытность его использо-

зования и затрудняет борьбу с ним. Трудность борьбы с таким оружием связана также с трудностью его обнаружения. Аппаратура по обнаружению должна вести разведку по всем возможным направлениям нападения. Эта аппаратура должна также принимать излучение в широком диапазоне частот, так как спектр излучения такого оружия может лежать в диапазоне от ультрафиолетовых до инфракрасных лучей.

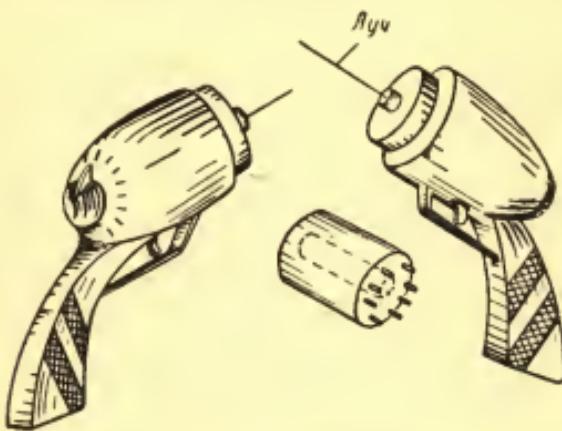


Рис. 4.18. Ручное радиационное оружие с использованием ОКГ.

Радиационное оружие может быть использовано для поражения глаз, вызывая обратимые или необратимые процессы. Воздействие излучения, сконцентрированного на сетчатке глаза хрусталиком, вызывает ее повреждение. Известны случаи временного ослепления нескольких экспериментаторов в результате случайного попадания излучения на глаза. Так как импульсы излучения оптического квантового генератора очень короткие, причем их длительность на несколько порядков короче времени рефлекса живого организма (рис. 4.19), то организм не успевает принять защитные меры.

Для защиты глаз от действия радиационного оружия предлагается использовать специальные линзы, изготовленные в виде очков, которые пропускают лишь часть видимого света. Потоки сильного теплового излучения и видимого света с высокой интенсивностью задерживаются и поглощаются такими линзами.

Другим средством защиты от такого оружия считается постановка экранирующих дымов на пути прохождения излучения. Это особенно эффективно при использовании дымов в качестве защиты от излучения видимого света. Например, за счет дымов, полученных

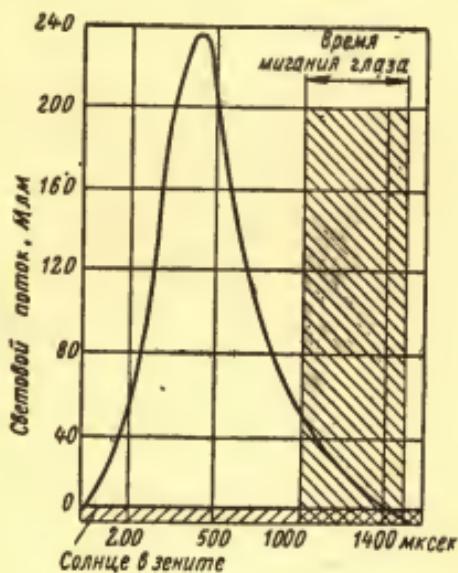


Рис. 4.19. График зависимости распределения излучения ОКГ во времени.

из окислов тяжелых металлов, излучение может быть ослаблено до 60—80% [12].

Контракты на разработку радиационного оружия были заключены несколькими организациями [61]. Например, Франкфордский арсенал армии занимается разработкой портативного оптического генератора, который является элементарным прообразом такого оружия.

#### ЛИТЕРАТУРА

иссий

1. Aviation Week, 1962, 15/I, v. 76, № 3, p. 92, 99, 101, 104, 105.
2. J. Scient. Instrum., 1962, v. 39, № 11, p. 541—542.
3. Electronic News, 1962, 26/XI, № 348, p. 4—5.
4. IRE Int. Conv. Rec., 1961, III, v. 9, P. 5, p. 285—290.
5. Electronics, 1962, v. 35, № 44, p. 14.
6. Missiles and Rockets, 1962, 9/IV, № 45, p. 23.

7. Brit. Communications and Electronics, 1962, VI, v. 9, № 6, p. 451.

8. Proc. IRE, 1961, v. 49, № 11, p. 1684.

9. 2nd Int. Conf. on Quantum Electronics, Berdey, Cal., III, 1961.

10. Proc. IRE, 1961, № 1, p. 331.

11. Electronics, 1961, v. 34, № 40, p. 60, 63.

12. Electronic Industries, 1962, v. 21, № 8, p. 90—96.

13. New Scientist, 1962, 16/VIII, № 300, p. 367.

14. Electronic News, 1961, 13/III, v. 249, № 6, p. 1, 27.

15. Electronics, 1961, 9/VI, v. 34, № 23, p. 24—25.

16. Electronics, 1961, 3/XI, v. 34, № 44, p. 44.

17. Ordnance, 1962, I—II, № 250, p. 560.

18. Electronics, 1963, 8/II, № 6, p. 7.

19. Electronic Design, 1962, 20/XII, № 26, p. 7.

20. Electronic News, 1963, 28/I, № 357, p. 30.

21. Missiles and Rockets, 1963, 26/VIII, № 9, p. 9.

22. Missiles and Rockets, 1963, 18/II, № 7, p. 24, 25.

23. Electronics, 1963, 15/II, v. 36, № 7, p. 7.

24. Aviation Week, 1963, 22/IV, v. 78, № 16, p. 54—59.

25. Electronic News, 1962, X, № 313, p. 32.

26. L'onde Electrique, 1963, t. 43, № 436—437, p. 738—748.

27. Electronic Design, 1961, № 22, p. 4, 6.

28. Aviation Week, 1962, v. 76, № 13, p. 41, 43, 45.

29. Electronics, 1961, v. 34, № 51, p. 17.

30. Science News Letter, 1958, v. 73, № 8, p. 121.

31. Electronic Industries, 1957, v. 16, № 9, p. 62—63.

32. Bell Laboratories Record, 1960, v. 38, XI, № 11, p. 403—407.

33. Science News Letter, 1960, 15/X, v. 16, p. 245.

34. Electronics, 1961, X, v. 34, № 40, p. 63—65.

35. 6-th Nat. Convention Military Electronics, 1961, VI, p. 279—284.

36. Electronic News, 1963, 27/III, v. 8, № 368, p. 42.

37. Electronics, 1963, 15/II, № 7, p. 84.

38. Aviation Week, 1962, 17/XII, № 25, p. 70.

39. Electronics, 1964, 10/I, № 2, p. 10, 11.

40. Локк А. С. Управление снарядами. Пер. с англ. Гостехиздат, 1957.

41. Смит Р., Джонс Ф., Чесмер Р. Обнаружение и измерение инфракрасного излучения. Под ред. В. А. Фабриканта. Изд-во иностранной литературы, 1959.

42. Electronics, 1962, 20/IV, v. 35, № 16, p. 56, 57.

43. Proc. IEEE, 1963, v. 51, № 1, p. 3—246.

44. Space Aeronaut., 1962, v. 38, № 6, p. 2, p. 63, 64.

45. Electronics, 1962, 5/X, v. 35, № 40, p. 44—45.

46. Electronic News, 1963, 28/I, v. 8, № 357, p. 19.

47. Missiles and Rockets, 1963, 21/I, v. 12, № 3, p. 21.

48. Electronic News, 1963, 14/I, v. 4, № 355, p. 1, 30.

49. West. Aerospace, 1964, v. 43, № 2, p. 8.

50. Electronic Design, 1962, 22/XI, v. 10, № 24, p. 152.

51. Electronics, 1962, 23/XI, v. 35, № 47, p. 14, 15.

52. Electronics, 1963, v. 36, № 8, p. 13.  
53. Sci. News. Letter, 1962, v. 82, № 21, p. 333.  
54. Electronics, 1963, v. 36, № 18, p. 72—78.  
55. Electronics, 1963, 21/VI, № 25, p. 8.  
56. J. Soc. Motion Picture and Telev. Eng., 1962, v. 71, № 11,  
p. 828—832.  
57. Interavia Air Letter, 1963, April 30, № 5233, p. 6.  
58. Electronic Design, 1963, 1/III, № 5, p. 11.  
59. Electronic News, 1963, 11/II, № 359, p. 20.  
60. Electronics, 1963, 19/IV, № 16, p. 7—8.  
61. Electronic News, 1963, 12/VIII, № 388, p. 1, 20.  
62. Electronic News, 1963, 28/X, № 401, p. 26.  
63. Missiles and Rockets, 1963, 16/IX, № 12, p. 24—25.  
64. Missiles and Rockets, 1963, 2/IX, № 10, p. 31.  
65. Electronics, 1963, 18/X, № 42, p. 24—25.  
66. Missiles and Rockets, 1963, 14/X, № 16, p. 30—33.  
67. Aviation Week, 1963, 9/IX, № 394, p. 19.  
68. Materials in Design Engineering, 1963, IX, № 3, p. 128.  
69. Aviation Week, 1963, 4/XI, № 19, p. 92.  
70. Electronic News, 1963, 12/VIII, № 338, p. 1, 20.  
71. Missiles and Rockets, 1963, 19/VIII, № 8, p. 23.  
72. Electronic Industries, 1963, IX, № 9, p. 85.  
73. Illustrated London News, 1964, 14/III, p. 384.  
74. Die Welt, 1964, 6/III, № 56, p. 1.

## ГЛАВА ПЯТАЯ

### ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ В РАКЕТНОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

#### 1. ВОЗМОЖНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ В РАКЕТНОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Из всех возможных областей применения оптических квантовых приборов наибольшее внимание в настоящее время за рубежом привлекают перспективы их использования в ракетной и космической технике.

Это объясняется в первую очередь тем, что свойства и особенности квантовых генераторов и усилителей оптических излучений могут обеспечить наиболее эффективное решение ряда основных проблем управления и обеспечения деятельности космических аппаратов различного назначения. При этом по разрешающей способности, помехоустойчивости и надежности квантовые приборы видимого и инфракрасного диапазонов значительно превосходят аналогичные радиотехнические средства [1, 2]. Кроме того, отсутствие такой оптически плотной среды, какой является атмосфера, на высотах начиная с 20—30 км позволяет получать с помощью оптических квантовых приборов практически одинаковые дальности действия по сравнению с радиолокационными и радиотехническими системами [2].

По данным иностранной периодической печати, даже с учетом рекламного характера некоторых публикаций, можно в настоящее время наметить следующие основные направления применения этих новейших технических средств в ракетном и космическом приборостроении.

В первую очередь это использование квантовых генераторов и усилителей видимого и инфракрасного диапазона.

пазонов в бортовой локационной и навигационной аппаратуре космических кораблей. С помощью такой аппаратуры могут решаться как чисто военные задачи по обнаружению и определению относительных координат разведуемого или поражаемого космического объекта, так и задачи космической навигации. В частности, вероятно, будет возможно с необходимой точностью осуществлять встречи космических кораблей, обеспечивать сближение космических платформ при их сборке (стыковке), обеспечивать посадку на планеты и астероиды.

Во-вторых, оптические квантовые генераторы предполагается использовать в бортовых и наземных системах наведения космических кораблей и ракет, основанных на том, что наводимый (управляемый) объект движется вдоль узкого луча квантового генератора, ориентированного в нужном направлении. Известны проекты применения оптических квантовых генераторов и в системах самонаведения противоспутников.

На генераторах и усилителях оптического диапазона возможно также создание наземных и бортовых устройств, обеспечивающих более надежное и эффективное слежение за искусственными спутниками Земли и баллистическими ракетами на траектории, чем это обеспечивают существующие оптические средства.

Новым и весьма перспективным [5] является предполагаемое использование оптических квантовых приборов в космических системах для передачи информации.

Основное место в иностранной периодической литературе занимают сообщения о работах по созданию нового вида космического вооружения, называемого радиационным оружием и основанного на использовании таких поражающих факторов лучей мощных оптических квантовых генераторов, как высокая температура и удельная плотность энергии излучения, создаваемые ими на облучаемой поверхности объекта.

## 2. ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ В БОРТОВОЙ АППАРАТУРЕ КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЕЙ

На рубиновом оптическом квантовом генераторе разработан когерентный локатор оптического диапазона, получивший название «Колидар» (Colidar-Coherent Light Detection and Ranging) [3, 4]. По принципу действия «Колидар» аналогичен радиолокатору, но рабо-

тает на длине волны  $0,6943 \text{ мк}$  и имеет ширину луча порядка  $0,3 \text{ мрад}$  ( $1,14 \text{ угл. мин.}$ ). Упрощенная блок-схема этого локатора показана на рис. 5.1. Основными элементами схемы являются передатчик, приемное устройство и индикаторный блок. Передатчик состоит из генератора излучений, источника возбуждения, оптической фокусирующей системы, хронирующего устройства со световым клапаном и источников питания.

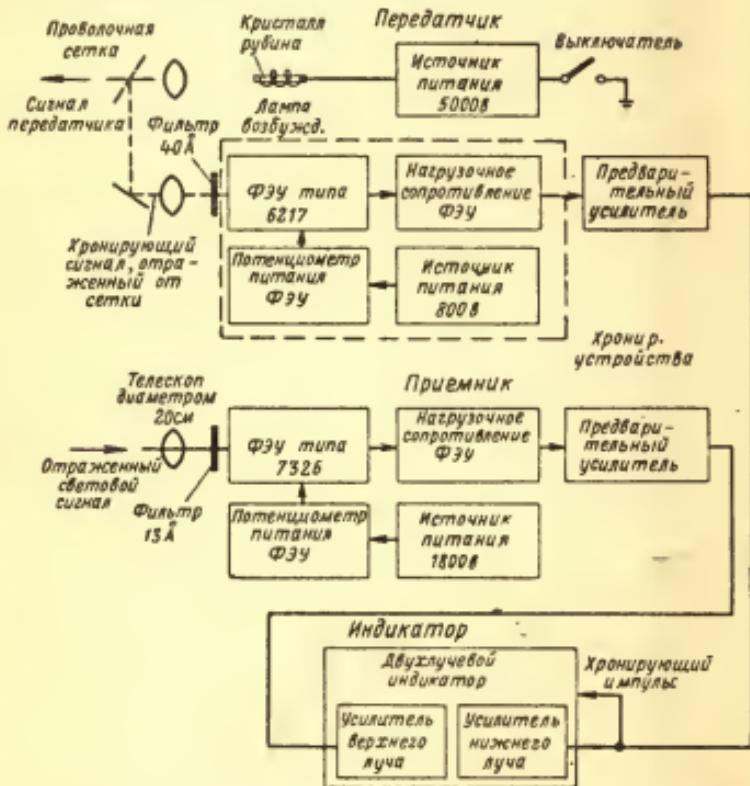


Рис. 5.1. Упрощенная блок-схема оптического квантового локатора «Колидар».

Рубиновый стержень диаметром 10 мм и длиной 37 мм расположен в объемном резонаторе из двух плоскопараллельных пластин, одна из которых является полупрозрачной, а вторая — зеркальной. На выходе генератора за полупрозрачной пластиной расположена оптическая фокусирующая телескопическая система,

обеспечивающая сужение луча в пределах угла порядка 0,3 мрад.

В качестве источника возбуждения используется спиральная лампа-вспышка, питающаяся от импульсного источника, обеспечивающего напряжение 4 кв при длительности импульса до 280 мксек. Перед объективом оптической системы располагается полуупрозрачная пластина или полированная металлическая сетка, установленная под углом 45° к оптической оси генератора. Пластина выполняет роль светоделителя, направляя часть излучаемого светового потока на приемное зеркало хронирующего устройства.

Генератор работает в импульсном режиме с частотой импульсов порядка 1 гц. Рабочая длина волны составляет 0,6943 мк (т. е. порядка 430 Мгц) при ширине полосы около 0,01 Å. В описанной конструкции генератор обеспечивает в импульсе мощность 1—2 квт при к. п. д. порядка 10%. Для повышения точности измерения дальности кроме светоделительного устройства в передатчике предусматривается дополнительное электрооптическое устройство, служащее для формирования более прямоугольного заднего фронта светового импульса. Таким устройством является ячейка Керра, управляемая напряжением, подаваемым от импульсного генератора.

Хронирующее устройство состоит из приемной оптической системы, включающей плоское зеркало и линзовый, или зеркальный, объектив узкополосного фильтра, фотоэлектронного умножителя со схемой питания и предварительного усилителя хронирующего импульса. Сигнал с фотоэлектронного умножителя типа 6217 фирмы RCA после предварительного усиления подается на индикаторный блок для запуска развертки осциллографа. Крутизна фронта опорного импульса обеспечивается предварительным усилителем.

Приемная часть локатора состоит из зеркального объектива с узкополосным фильтром (ширина полосы 13 Å), ФЭУ типа 7326 фирмы RCA с источником питания и предварительным усилителем. Узкая направленность луча, соосность оптических систем передающей и приемной частей и узкая полоса пропускания приемного фильтра обеспечивает высокую помехозащищенность.

Индикаторный блок содержит двухлучевой осциллограф с раздельным усилением для верхнего и нижнего лучей, фиксирующих соответственно отраженный сигнал от цели и опорный сигнал от хронирующего устройства передатчика.

Так как развертки обоих лучей синхронно запускаются импульсом хронирующего устройства, то по разнице в положении на экране осциллографа двух импульсов, от цели и от передатчика, определяют дальность до цели. Параметры и особенности описанной конструкции не являются типичными, так как рассматриваются опытные лабораторные образцы приборов. Представление об общих габаритах могут дать следующие опубликованные данные: общий вес конструкции 11—14 кг, диаметр зеркального объектива приемного устройства около 200 мм, длина трубы приемного устройства 950 мм [3, 4].

Оптико-электронный локатор «Колидар» по разрешающей способности превосходит современные радиолокаторы СВЧ диапазона. По предварительным расчетам дальность действия локатора в космическом пространстве может составить более нескольких сотен километров.

Другой образец оптико-электронного локатора, который может быть использован для определения расстояния при встрече двух космических кораблей, разработан фирмой Martin (США) [5]. Принцип действия и схема этого локатора подобны описанной выше. В качестве генератора излучений применен рубиновый стержень диаметром 6 мм и длиной 50 мм, возбуждаемый импульсной лампой-вспышкой типа FX-38 с энергией 212 дж. Линзовая фокусирующая система передатчика обеспечивает угол раствора выходящего луча около 1 мрад (3, 4 угл. мин). В передатчике предусмотрено также хронирующее устройство, посылающее опорный сигнал на индикаторный блок. Приемная часть имеет объектив с фокусным расстоянием 340 мм и диаметром входного отверстия 120 мм. В объективе предусмотрено диафрагмирование поля зрения, ограничивающее угол поля зрения до 1—1,5 мрад. Приемником отраженных от цели импульсов служит ФЭУ типа 7265, перед которым установлен узкополосный фильтр с полосой пропускания  $10 \text{ \AA}$ .

Сигнал с выхода ФЭУ подается на предварительный усилитель с полосой пропускания 10 Мгц, обеспечивающий усиление до 30 дБ.

В отличие от схемы «Колидар» индикаторное устройство локатора фирмы Martin показывает не форму и положение сигналов на экране осциллографа, а непосредственно измеренное расстояние в цифровой форме. При этом индикатор дает это расстояние не в единицах длины, а числом периодов времени, необходимых для прохождения световым лучом двойного пути в 15 м. Для этого в схеме измерительного контура индикаторного блока имеется специальный кварцевый генератор, работающий на частоте 9835 кгц, период которой, равный 102 нсек, и соответствует этой величине. Для определения интервала времени, а следовательно, и расстояния, проходимого световым лучом до цели и обратно, служит специальный счетчик числа периодов генератора за время с момента посылки импульса генератором и до получения отраженного сигнала. Синхронизация работы передатчика и измерительной схемы обеспечивается хронирующим устройством. Общий вес прибора составляет 27 кг.

Разработан также допплеровский оптико-электронный локатор на основе оптического квантового генератора непрерывного действия [6]. Этот локатор предназначен для использования в бортовой аппаратуре непосредственно для обеспечения встречи космических кораблей на орбите. Оптический квантовый генератор передатчика работает на смеси гелий—неон, излучая основную волну длиной 11530 Å. Ширина полосы излучения составляет менее 1 кгц. Луч генератора (рис. 5.2) на выходе расщепляется с помощью полупрозрачной пластины на два луча, один из которых проходит прямо к встречному космическому кораблю, от поверхности которого (или от укрепленного на нем специального зеркала) отражается обратно. Второй луч отклоняется на 90° и направляется на неподвижное зеркало, после отражения от которого возвращается на расщепитель лучей. На него же падает и луч, отраженный от второго объекта. После расщепителя оба луча попадают на приемный ФЭУ,

Если второй космический объект неподвижен относительно первого, то оба луча, падающие на ФЭУ, имеют одинаковую частоту. Если же второй объект перемещается относительно первого, то его движение вызывает появление допплеровского сдвига частот колебаний этих двух лучей, который может с помощью индикаторного устройства отсчитываться непосредственно в единицах относительной скорости. Такой локатор может определять скорость космических кораблей в пределах от 8 км/сек до 0,003 см/сек [8, 38].

Аналогичный по принципу действия оптико-электронный локатор «Ладар» разработан на квантовом генераторе типа SLG-201 непрерывного действия, работающем на смеси гелий—неон [6, 8, 9]. Этот локатор обладает точностью, в 10 000 раз большей, чем допплеровские

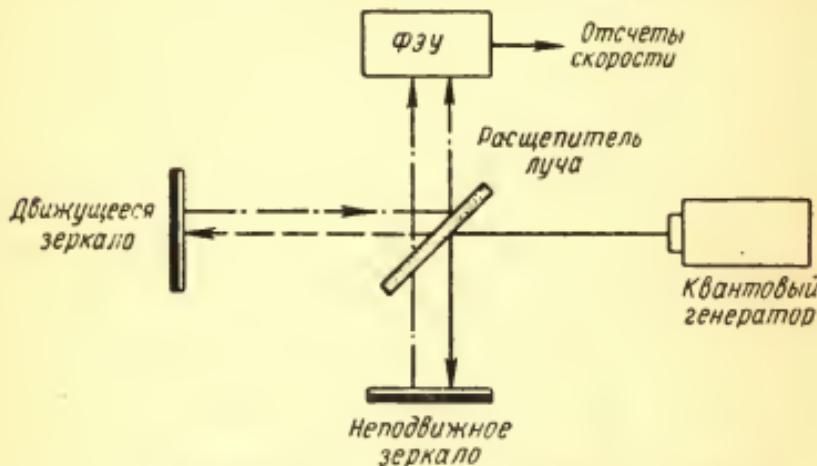


Рис. 5.2. Принципиальная схема допплеровского оптического локатора.

радиолокаторы, и может измерять относительные скорости двух встречающихся космических кораблей в пределах от 5 км/сек до 25 мк/сек.

Наряду с разработкой опытных образцов оптико-электронных локаторов с оптическими квантовыми генераторами в США ведутся теоретические исследования по выработке оптимальных требований к таким системам. При этом рассматриваются два варианта: сближение кооперируемых (своих) космических кораблей и опознавание (инспекция) кораблей противника.

В частности, системы первого варианта должны обеспечить выполнение следующих условий. Измерения дальности должны производиться с точностью до 1% в пределах от 240 км и до момента соединения космических объектов. Измерения скорости — также с точностью до 1% в пределах от 120 до 0,03 м/сек. Угловая скорость должна измеряться с точностью до 0,1—0,5 мрад/сек. Для обеспечения этих требований бортовая аппаратура должна содержать радиотехнические, инфракрасные и оптические локационные системы.

Разрабатываются проекты непосредственной реализации схем локаторов с оптическими квантовыми генераторами в создаваемых в США системах противоракетной обороны. Так, проект «Бэмби» [11] предусматривал использование приборов инфракрасного диапазона в бортовых системах, служащих для обнаружения запускаемых баллистических ракет и слежения за ними на активном участке траектории с одновременным измерением расстояния до ракеты с помощью локаторов с оптическими квантовыми генераторами. Установка оптико-электронных локаторов с квантовыми генераторами возможна и на других типах спутников.

Специально для обеспечения выполнения маневра при встрече и процесса сближения космических кораблей по заданию BBC США разрабатываются когерентные оптико-электронные локаторы с оптическими квантовыми генераторами. При этом наряду с разработкой опытных образцов планируется проведение исследований метода осуществления встречи. Эти разработки ведутся применительно к проекту космического корабля «Блю-Джемини» [45, 46].

Большое внимание в иностранной печати уделяется также работам по использованию оптических генераторов для обеспечения космической навигации. Проводятся исследования возможности создания альтиметра на оптическом квантовом генераторе для обеспечения сближения с Луной и посадки на ее поверхность.

Проектируется также навигационная система для космического корабля с использованием генератора непрерывного излучения. Эта система должна работать на основе эффекта Допплера и обеспечивать с точностью до 1 м/сек измерение скорости космического корабля, находящегося на высоте 480 км.

Исследуются также возможности создания космических навигационных систем с использованием оптических квантовых приборов [11, 12]. Такие системы смогут широко использоваться для измерения расстояний и скоростей во время космических полетов и при посадке на планеты и астероиды.

Предполагается, что они будут иметь значительно большую точность, чем радиолокационные, и в ближайшие десять лет практически вытеснят последние. Проведенные расчеты показывают, что оптико-электронный локатор с квантовым генератором и объективом диаметром 60 см при средней мощности 66 вт может обеспечить измерение расстояния в космосе до 160 000 км с точностью до 1,6 м. Мощность, потребляемая таким локатором, не будет превосходить 800 вт.

Для подготовки посадки космического корабля при измерении высоты его пролета над гористой поверхностью планеты такой локатор, обладающий крайне узкой диаграммой направленности луча, будет измерять не среднюю высоту над сравнительно большим участком поверхности, как это делает радиолокатор, а истинную высоту над данным местом посадки.

Оптико-электронный дальномер с квантовым генератором, работающий на использовании эффекта Доплера и предназначенный для измерения величины и направления вектора скорости космического корабля относительно поверхности Луны на высоте 1600 км с точностью 0,1%, должен иметь мощность порядка 40 мвт при частоте измерений 1 раз за 8 сек. Вес такой системы должен составлять около 4,5 кг. При высоте пролета над поверхностью Луны, равной 5000 км, такая система при всех прочих равных условиях должна обеспечивать среднюю мощность излучаемого сигнала порядка 40 вт.

Сравнительная оценка возможностей применения в космической навигации радиолокационных систем и оптических квантовых приборов показывает, что в большом числе случаев последние будут обладать рядом преимуществ [15]. Так, при одинаковых диаметрах антенных устройств, если объект, относительно которого измеряется скорость, настолько велик, что для обеих систем его площадь равна или больше сечения луча, то допплеровский сдвиг частот получается при практичес-

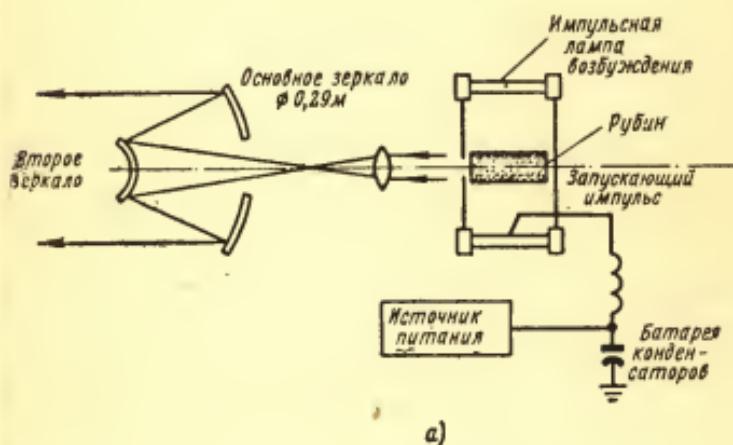
ски одинаковых мощностях сравниваемых систем. При этом точность, получаемая с помощью оптико-электронной системы, значительно выше, чем получаемая с помощью радиолокационной системы, особенно в случае, когда вектор скорости космического корабля не перпендикулярен поверхности планеты и более широкий луч радиолокатора, захватывая большую площадь, дает значительное расширение допплеровского сдвига.

При поиске удаленного и малоразмерного объекта путем сканирования части пространства большим преимуществом обладают радиолокационные системы, однако в случае равенства времен поиска требуемая от этих систем мощность одинакова.

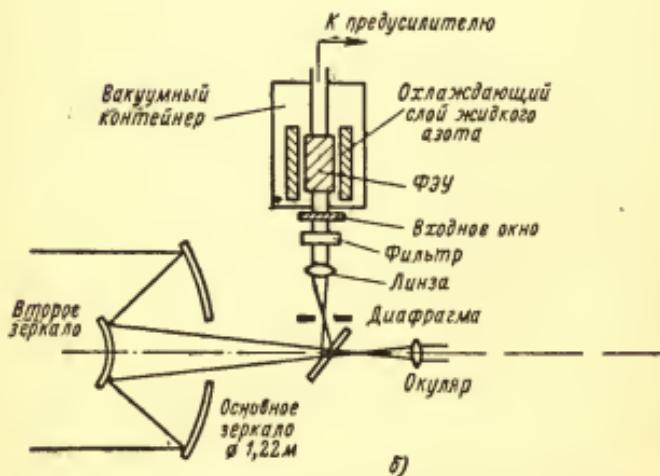
Если положение обнаруживаемого объекта определено заранее и оптико-электронный локатор ориентирован в нужном направлении, то с точки зрения минимальной мощности более выгодна система с оптическим квантовым генератором. Если для посадки космического корабля на поверхность Луны будет использоваться радиолокационная система с антенной диаметром 18 м, то она может обеспечить лишь в 2000 раз меньшую точность по сравнению с допплеровским оптико-электронным локатором, имеющим антенну диаметром 0,6 м [13].

Перспективы применения оптических квантовых генераторов в локационных системах не ограничиваются только бортовой аппаратурой космических кораблей и искусственных спутников Земли. Уже известны примеры применения квантовых генераторов и в наземных локационных системах, предназначенных для решения космических проблем.

Так, в мае 1962 г. в США лабораторией Линкольн, Массачусетского технологического института с помощью оптико-электронного локатора была осуществлена локация поверхности Луны [14]. Для этого был использован мощный оптический квантовый генератор на рубине. Кристалл рубина имел длину 150 мкм и возбуждался системой накачки из четырех ксеноновых импульсных ламп. Для повышения коэффициента полезного действия рубин охлаждался до температуры жидкого азота. При этом энергия в импульсе составляла 50 дж при длительности импульса 0,5 мсек. Упрощенная схема передающей и приемной частей оптико-электронного локатора [14] показана на рис. 5.3.



а)



б)

Рис. 5.3. Упрощенная схема передающего (а) и приемного (б) устройства аппарата, использовавшейся при локации Луны.

В передающей части излучаемый генератором луч фокусировался оптической системой с диаметром основного зеркала порядка 300 мм. Приемная часть имела зеркальный объектив диаметром около 1220 мм, светофильтровое устройство и фотоумножитель находились в криостате. Перед входным окном ФЭУ помещался узкополосный фильтр для срезания помех. ФЭУ, охлаждаемый до температуры жидкого азота, соединялся на выходе с предусилителем. Указанный на схеме окуляр предположительно предназначен для наведения прибора. Отраженный от поверхности Луны сигнал был получен через 2,5 сек.

### 3. ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В СИСТЕМАХ НАВЕДЕНИЯ И АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАКЕТ

Использование радиотехнических и оптических средств для создания систем наведения снарядов и ракет вдоль созданного такой системой луча хотя и было принципиально возможно, однако практически ограничивалось значительной шириной угла раствора («лепестка») генерируемого луча и, следовательно, малой точностью таких систем. Узкая направленность луча оптических квантовых генераторов создает реальные возможности осуществления таких систем [15].

Основным преимуществом систем наведения с оптическими квантовыми генераторами является возможность получения очень высокой точности, а также сложность создания искусственных помех их работе. Одним из опытных образцов такой системы является космическая полуактивная система для наведения по лучу квантового оптического генератора спутников-перехватчиков [16]. В такой системе вдоль луча оптического генератора, направляемого со спутника-истребителя на ИСЗ противника, наводится выпущенная противоракета.

Проводятся также исследования по созданию средств наведения на цель и управления полетом противоракет с помощью узких лучей квантовых генераторов.

Одной из новых и перспективных областей применения оптических квантовых генераторов в ракетной и

космической технике считается использование оптических гироскопов (см. гл. 4) в качестве приборов для измерения угловых перемещений (Angular Rotation Sensor) в системах автономного управления [35]. Нечувствительность таких приборов к линейным ускорениям, изменениям силы тяжести и вибрациям создает благоприятные возможности для исследования путей их применения в бортовой аппаратуре.

#### 4. СИСТЕМЫ С ОПТИЧЕСКИМИ КВАНТОВЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ ДЛЯ СЛЕЖЕНИЯ ЗА РАКЕТАМИ И КОСМИЧЕСКИМИ КОРАБЛЯМИ

Эта область применения оптических генераторов является одной из основных в исследованиях и разработках, проводимых рядом фирм и организаций по заказам ВВС и других военных организаций США.

Работы в этом направлении, проводимые в США достаточно широким фронтом, основаны на использовании свойства оптических квантовых генераторов создавать чрезвычайно высокую яркость при узкой направленности излучений. Целью этих работ является повышение дальности действия и надежности применяемых в настоящее время оптических средств слежения за ракетами и спутниками с наземных наблюдательных пунктов, а также разработка эффективных систем слежения в космосе. Наиболее крупной работой является создание точной наземной оптической системы слежения (PIRT) за баллистическими ракетами на активном участке траектории с использованием оптического генератора с непрерывным излучением [39].

Разрабатывается также наземная система слежения за ракетами на высотах до 20 км. Действие системы основано на приеме и анализе излучений оптического квантового генератора, отраженных оптическими устройствами, установленными на ракете.

Другая наземная следящая система была предназначена для слежения за полярным спутником S-66 [18, 35]. В системе (рис. 5.4) предусмотрен «активный» принцип действия, т. е. луч квантового генератора наземной установки направляется на спутник и после отражения от его поверхности улавливается приемным устройством. Для усиления отраженного сигнала на спутнике предусматривается установка 360 оптических

зеркальных углковых отражателей, каждый размером около 1,3 см. Приемные устройства наземного пункта включают точные фотографические измерительные камеры и телескоп с трубкой типа суперортикон.

Параметры системы: ширина луча оптического квантового генератора  $1 \cdot 10^{-3}$  рад, длительность импульса 1 мксек, разрешающая способность по дальности 30 м, ожидаемая дальность действия системы 1500 км. Для проверки возможностей системы были проведены предварительные испытания по самолету, на котором устанавливалась уменьшенная модель системы из четырех-

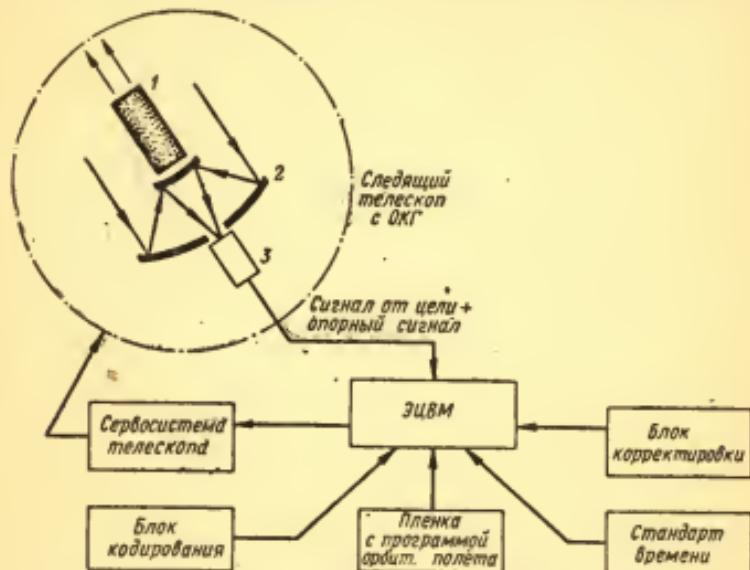


Рис. 5.4. Блок-схема наземной установки, предназначенной для слежения за ракетами и ИСЗ:

1 — оптический квантовый генератор, 2 — зеркальная оптическая система, 3 — суперортикон.

пяти углковых отражателей. По отраженному сигналу квантового генератора самолет был обнаружен на высоте примерно 18,3 км (20 000 ярдов), что в масштабе эксперимента подтверждает возможность обнаружения спутника на расчетных высотах.

В качестве излучателя в генераторе используется кристалл вольфрамата кальция с примесью неодимия. В первом варианте оптического генератора при длительности импульса 1 мксек и частоте 200 имп/сек пиковая

мощность в импульсе составляет около 1 Мвт. С помощью линзовой фокусирующей системы угловая ширина луча сужена до 2 мрад. При диаметре объектива генератора 12,7 см и установке на объекте слежения угловых отражателей размером 5 см предполагается получить точность измерения дальности около 4,5 м и угловую точность 0,1 мрад. Для этого варианта дальность действия составляет всего около 16 км. При увеличении диаметра объектива генератора до 50 см, сужении луча до 0,5 мрад, повышении пиковой мощности в импульсе до 1 Мвт и доведении числа импульсов до 1000 имп/сек, как это предполагается сделать в усовершенствованном варианте системы, дальность слежения за объектом с такими же угловыми отражателями должна увеличиться до 110 км [19].

Разрабатывается также [35] наземная система, состоящая из мощного оптико-электронного локатора на квантовом генераторе, и оптическая следящая система, осуществляющая наведение локатора на спутник.

Кроме систем слежения, основанных на «активном» принципе, т. е. с облучением объекта и регистрацией отраженного от него сигнала, разрабатываются и другие виды систем, основанных на приеме сигналов, излучаемых оптическими квантовыми генераторами, размещенными непосредственно на борту ракеты или спутника.

Разрабатывается система, состоящая из бортового передатчика на оптическом квантовом генераторе и наземного следящего комплекса [20—23]. В передатчике используется генератор на рубине, имеющий рабочую длину волны 0,6943 мк и энергию излучения 20 дж. С помощью зеркальной системы и специального устройства из оптических волокон излучение генератора рассеивается в пределах угла 180° для того, чтобы обеспечить возможность обнаружения ракеты несколькими станциями слежения, расположеннымными в различных пунктах. Для повышения к.п.д. передатчика оптический генератор предполагается охлаждать до температуры жидкого азота.

В наземном следящем комплексе будут использованы специальные фотографические измерительные широкоугольные камеры ВС-4, снабженные узкополосными интерференционными фильтрами, умень-

шающими влияние световых помех. Кроме этого, для сведения к минимуму засветки от фона предполагается использовать синхронизацию быстродействующих затворов фотографических камер, обеспечивая их открытие только в моменты вспышек бортового генератора. Проектируемая система должна иметь также специальные следящие устройства для удержания ракеты в поле зрения фотографических камер. Система рассчитана на дальность действия до 800 км и должна работать в любое время суток. Измерения координат траектории ракеты производятся каждые 10 сек. Полученные результаты позволяют определять траекторию, силу тяги и устойчивость ракеты. По мнению проектировщиков, система слежения с оптическим квантовым генератором смогла бы работать более точно, чем радиотехнические системы.

## 5. ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ПРИБОРЫ В КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Как отмечается, важной проблемой на пути развития космической техники является создание быстродействующих, направленных, помехоустойчивых и надежных средств связи и передачи информации на расстояния, необходимые для обмена информацией как между космическими кораблями, так и между Землей и другими планетами. Оказывается, что характеристики оптических квантовых генераторов дают и в этом случае основания для развертывания весьма перспективных исследований по созданию новых видов космической связи. Высокая когерентность излучения при узкой направленности луча и большой частоте колебаний, порядка  $1 \cdot 10^{14}$  Гц, а также полученные уже в настоящее время пиковые мощности в импульсе до 10—100 Мвт позволяют создавать системы для связи и передачи огромного количества информации между удаленными космическими объектами [24].

Предполагается [25], что уже при современном уровне развития оптических квантовых генераторов можно осуществить системы межпланетной связи на расстояния, измеряемые несколькими десятками световых лет. Возможность выделения сигнала, создаваемого такой системой на фоне шумов, обеспечивается превышением

интенсивности сигнала над излучением Солнца в данном рабочем диапазоне частот при одновременном сужении полосы пропускания приемного устройства. Одним из возможных вариантов такой системы можно считать схему, состоящую из 25 одинаковых оптических квантовых генераторов, оси которых расположены параллельно. Каждый из этих генераторов снабжен фокусирующей системой с объективом диаметром 4 дюйма (около 10 см). Ширина луча такой системы составляет  $5 \cdot 10^{-6}$  рад (1 угл. сек). Интенсивность излучения превосходит примерно в три раза излучение Солнца.

Системы связи с использованием оптических квантовых генераторов требуют для своей работы меньших мощностей, чем радиотехнические и некогерентные оптические системы связи. Если для системы связи на оптическом генераторе требуется около  $1 \cdot 10^{-16}$  вт на двоичный знак передаваемой в секунду информации, то для аналогичной радиотехнической системы диапазона СВЧ необходимо иметь около  $1 \cdot 10^{-7}$  вт на двоичный знак в секунду.

В одном из возможных вариантов блок-схем систем космической связи (рис. 5.5) сигнал передатчика, состоящего из оптического квантового генератора, модулятора излучений, усилителя низкой частоты и фокусирующего луча оптической системы, модулируется с помощью, например, звукового микрофона и направляется точно (в пределах угла раствора луча) на приемник, расположенный на другом космическом объекте.

Приемник состоит из оптической системы, воспринимающей сигнал передатчика и направляющей его на оптический квантовый усилитель, выполняющий в этой схеме роль предварительного усилителя. Затем сигнал поступает на фотодетектор и демодулятор, после которого восстанавливается первоначальная частота, например звуковая. Применение в качестве предусилителя оптического квантового усилителя наряду с возможностью получить очень высокий коэффициент усиления позволяет осуществить высокую помехозащищенность линии связи, так как сигнал будет приниматься и усиливаться только, если его частота совпадает с рабочей полосой частот усилителя, а стимулированное излучение в нем возникает только в случае, если направление падающего луча строго параллельно оптической оси квантового усилителя.

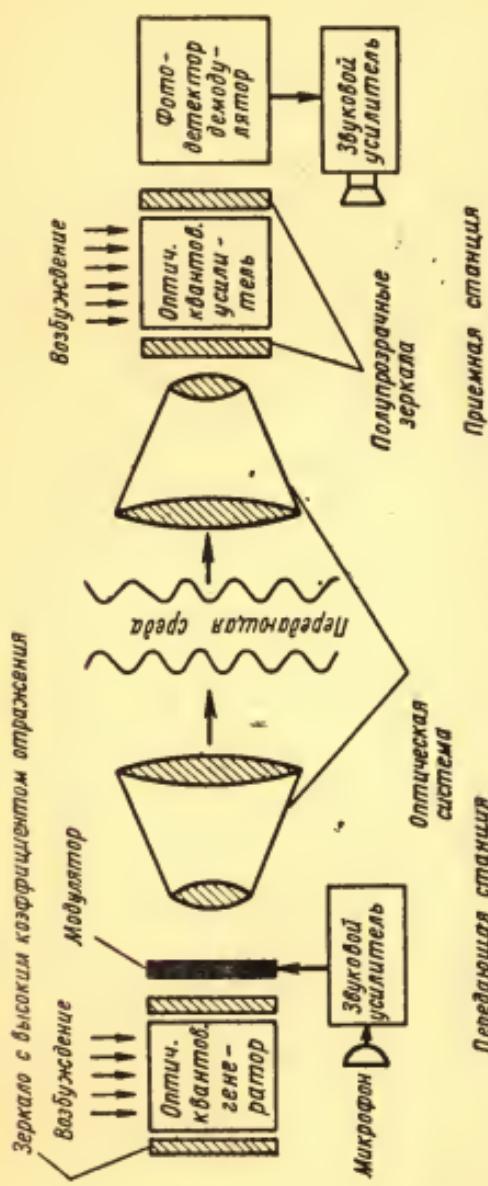
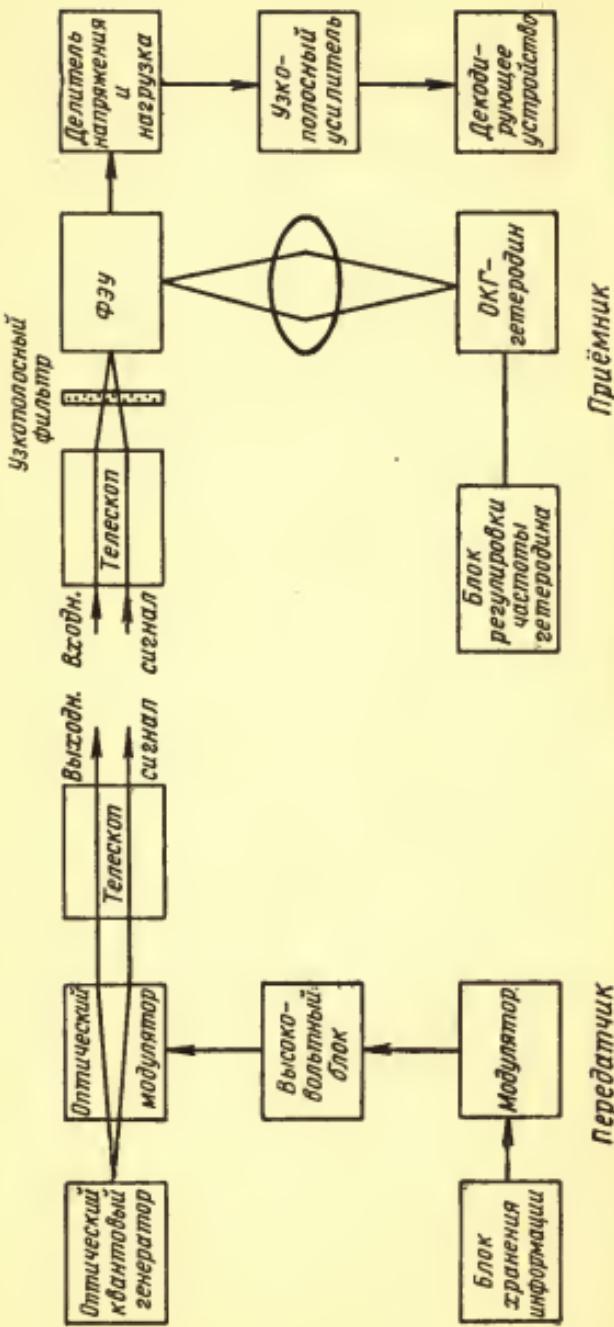


Рис. 5.5. Блок-схема системы связи с использованием оптических квантовых приборов.



Другой вариант схемы (рис. 5.6) отличается от предыдущего блок-схемой приемной части. Здесь после оптической системы принимаемый сигнал подается на фотоэлектронный умножитель. Одновременно имеющийся в схеме приемника оптический квантовый генератор, работающий на частоте, несколько отличной от частоты передатчика, вырабатывает второй сигнал, который также направляется на фотоэлектронный умножитель. В результате на выходе фотоэлектронного умножителя возникает результирующий сигнал, содержащий передаваемую информацию. В такой схеме оптический квантовый генератор приемника выполняет функции гетеродина.

Предложен и такой вариант схемы приемного устройства, в котором сигнал от передатчика с помощью дихроичного зеркала, пропускающего монохроматичный световой поток только определенной частоты, смешивается с сигналом от оптического квантового генератора-гетеродина. Суммарный сигнал поступает на фотодетектор, который выделяет модулирующий сигнал, реагируя на изменение уровня интерференции этих двух сигналов [27].

Практическая реализация схем космической связи затруднена в настоящее время необходимостью решения ряда сложных задач, например нахождения оптимальных источников возбуждения (накачки) оптических квантовых приборов передатчика и приемника, обеспечения строгой направленности линии связи, обнаружения корреспондента и других. Поэтому в разрабатываемых проектах космических систем связи на оптических генераторах намечаются направления дальнейших работ по преодолению указанных трудностей.

Для уменьшения габаритов и веса источника возбуждения для аппаратуры связи исследуются возможности использования в качестве источника возбуждения энергии Солнца [27].

Для обеспечения строгой направленности линии связи при взаимной ориентации двух корреспондентов необходима специальная аппаратура целеуказания и слежения, точность которой определяется угловой шириной луча оптических квантовых генераторов. Существующие в настоящее время системы ориентации и стабилизации

положения космических кораблей еще не удовлетворяют этим требованиям.

Обнаружение космических объектов, с которыми необходимо установить связь, предполагается осуществлять различными способами, например с помощью поисковых радиолокаторов, оптических бортовых маяков с квантовыми генераторами и рассеивающей оптикой, широкоугольных систем фотодетекторов и других [25].

Имеющиеся расчетные данные [24, 26] позволяют оценить эффективность применения оптических квантовых приборов в системах космической связи между планетами солнечной системы. Так, при использовании схемы связи с квантовым генератором в передатчике и с квантовым усилителем в приемном устройстве, работающим на волне  $1 \text{ мк}$ , при диаметре оптических систем

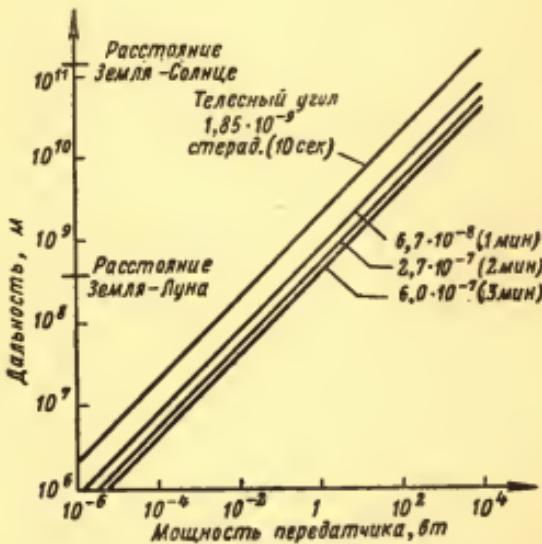


Рис. 5.7. Зависимость дальности действия цифровой оптической системы связи от мощности передатчика и угловой ширины его луча.

10 см и полосе частот 35 кГц, для передачи информации на расстояние  $2 \cdot 10^8$  км (расстояние от Земли до Меркурия) требуется мощность в импульсе около 12 Мвт. Для передачи на расстояние  $2,4 \cdot 10^8$  км (с Земли на Венеру) необходима мощность около 19 Мвт.

Для осуществления цифровой оптической связи с Луной при условии, что передатчик расположен за пределами земной атмосферы, считается возможным использовать передатчик на оптическом квантовом генераторе с мощностью 1 вт, работающем на волне 0,5 мк. Угловая ширина луча передатчика и соответственно угол поля зрения приемной оптической системы должны составлять не более  $1,85 \cdot 10^{-9}$  стерад. В качестве приемника предполагается использовать обычный фотоэлектронный умножитель с узкополосным фильтром. При полосе пропускания 3 Мгц отношение сигнал/шум может быть получено равным 135, что обеспечивает возможность передачи информации со скоростью порядка  $6 \cdot 10^6$  посылок в секунду. При повышении мощности передатчика до сотен ватт скорость передачи может быть доведена до нескольких миллионов посылок в секунду.

Для характеристики возможного улучшения параметров системы космической связи на рис. 5.7 приведен график, показывающий зависимость дальности действия такой системы от мощности оптического квантового генератора передатчика и угловой ширины его луча [26].

Системы для передачи информации, основанные на использовании оптических квантовых приборов, разрабатываются не только для обеспечения связи между космическими кораблями, но и для контроля за работой бортовой аппаратуры при испытаниях ракет.

Одной из последних разработок в этом направлении является созданная в США широкополосная телеметрическая система с оптическим квантовым генератором на диоде из мышьяковистого галлия [41].

Система состоит из передатчика, включающего в себя зеркальный объектив, оптический квантовый генератор, блок модуляции излучения и источник питания. Один генератор создает излучение на волне около 0,9 мк с выходной мощностью 70 мквт. С помощью объектива угол раствора луча уменьшается до 1°. Модуляция осуществляется с помощью полупроводникового усилителя, имеющего на входе полосу частот от 30 гц до 12 Мгц. Источником питания является 6-я батарея.

Приемное устройство состоит из объектива диаметром 20 см, фотоумножителя с кислородно-цециевым фотокатодом, блоков обработки и регистрации. Примене-

ние диодного генератора позволило сделать систему весьма малогабаритной и ее вес составляет не более 4,5 кг.

Разработка систем с оптическими квантовыми генераторами для обеспечения связи между искусственными спутниками Земли или ракетами и наземными приемными пунктами требует рассмотрения ряда новых вопросов, таких, как:

- влияние атмосферы и изменения ее состояния на распространение вертикальных и наклонных лучей квантовых генераторов,

- определение степени ослабления лучей и выявление необходимости создания специальных ретрансляторов, находящихся за пределами атмосферы,

- исследование влияния изменения высоты орбиты и положения спутника на возможность наведения луча вдоль линии связи и др.

С целью получения ответов на эти и ряд других вопросов Национальное управление по аeronавтике и исследованию космического пространства США приступило к работам по созданию системы для односторонней связи между спутником, находящимся на орбите с высотой 180—550 км и наземным приемным пунктом. В системе предполагается использовать диодный оптический квантовый генератор на мышьяковистом галлии. Полоса модуляции предполагается не менее 5 кгц. Требования к мощности и ширине луча генератора определяются условием, чтобы на приемном пункте отношение сигнал/шум составляло не менее 10 дБ при максимальной дальности передачи. Большое внимание при разработке системы должно быть обращено на решение проблем целеуказания, слежения и захвата сигнала, передаваемого с борта спутника [42, 43].

## 6. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО И ПРОТИВОРАКЕТНОГО РАДИАЦИОННОГО ОРУЖИЯ

Проблема создания нового вида вооружения для борьбы с баллистическими ракетами, искусственными спутниками Земли и космическими кораблями противника, основанного на использовании острофокусированного излучения мощных оптических квантовых генераторов, широко обсуждается на страницах иностран-

ной технической печати. Возможность создания и разработка методов применения радиационного оружия, называемого иногда «лучами смерти», привлекает внимание военных специалистов США в первую очередь потому, что проектируемые в настоящее время системы противоракетной обороны США недостаточно эффективны или чрезвычайно дороги. Так, система ПРО, основанная на применении ракет «Ника — Зевс» [27], стоит около 50 млрд. долл., а возможность реализации системы ПРО с использованием противоспутников типа «Бэмби» предполагает такие затраты, что ставит под сомнение реальность этого проекта.

В качестве основных преимуществ радиационного оружия в случае его применения в космическом пространстве указываются: скорость распространения излучений (равная скорости света), отсутствие рассеивания и потерь в среде, а также исключение чрезвычайно сложного и громоздкого наземного оборудования, необходимого для вычисления точки встречи противоракеты (или противоспутника) с целью, выработки команд на запуск и управление противоракетой. Кроме того, в случае применения радиационного оружия для уничтожения атомных и термоядерных боеголовок баллистических ракет ожидается меньшее радиоактивное заражение космоса и атмосферы по сравнению с результатами воздействия противоракет с ядерными головками.

Принцип действия космического радиационного оружия, также как и в случае применения его в наземных условиях, основан на том, что узкосфокусированный луч квантового генератора может создавать на поверхности облучаемого объекта очень высокую температуру при огромной удельной плотности энергии. Предполагается, что в результате этого можно добиться разрушения оболочки корпуса ракеты или космического объекта и, как следствие, вывода его из строя.

Предполагают, что «прожигание» материала поверхности поражаемого объекта достигается за счет местного взрыва, когда под действием короткого, но мощного импульса энергии луча оптического генератора возникновение и быстрое расширение газообразных продуктов распада материала оболочки вызывает ее местное разрушение. Считается, что такой «эффект

взрыва» будет способствовать разрушению боеголовок ракет.

В качестве возможных методов применения радиационного оружия указывают [28—30] два: постановку его на борту противоракеты, противоспутника или другого космического носителя и создание мощных наземных установок, расположенных, например, на вершинах гор. В первом случае [30] мощный оптический квантовый генератор проектируется установить на спутнике, управляемом с помощью радиолокатора целеуказания, следящего радиолокатора и бортового оптико-электронного локатора точного слежения за целью. Такой же генератор может быть установлен на борту управляемого противоракетного снаряда.

Одним из направлений применения радиационного оружия в космосе по мнению Министерства Обороны США [44] является его использование на пилотируемых спутниках Земли с целью поражения ракет на начальном участке траектории. Указывается, что при положительных результатах исследования такой возможности будет выдан заказ на разработку оптического квантового генератора для одного из проектов спутников.

Рассматривается также возможность создания специальной орбитальной космической платформы, на которой должны быть установлены радиолокационные системы обнаружения и слежения за объектами и мощные установки оптических квантовых генераторов, имеющие системы искажки солнечными лучами.

В проекте создания мощной наземной установки радиационного оружия, предназначением для борьбы с межконтинентальными ракетами и размещаемой на вершинах гор для ослабления влияния плотных слоев атмосферы [29, 30], предполагается создать целый комплекс оптических, радиолокационных и вычислительных систем. Основными элементами такого комплекса (рис. 5.8) должны являться:

- радиолокатор, обеспечивающий обнаружение ракеты и грубое слежение за ее траекторией;
- оптико-электронный локатор точного слежения на базе оптического квантового генератора, наводимый на ракету по данным радиолокатора грубого слежения;
- мощный оптический квантовый генератор, снабженный оптической фокусирующей системой и средст-

вами для автоматического сопровождения ракеты до момента ее поражения.

Кроме этого, в комплексе предусматривается центр управления с электронной вычислительной машиной, получающий данные о приближении ракет от радиолокационных станций дальнего обнаружения, и энергогенератор, обеспечивающий питание всего комплекса.

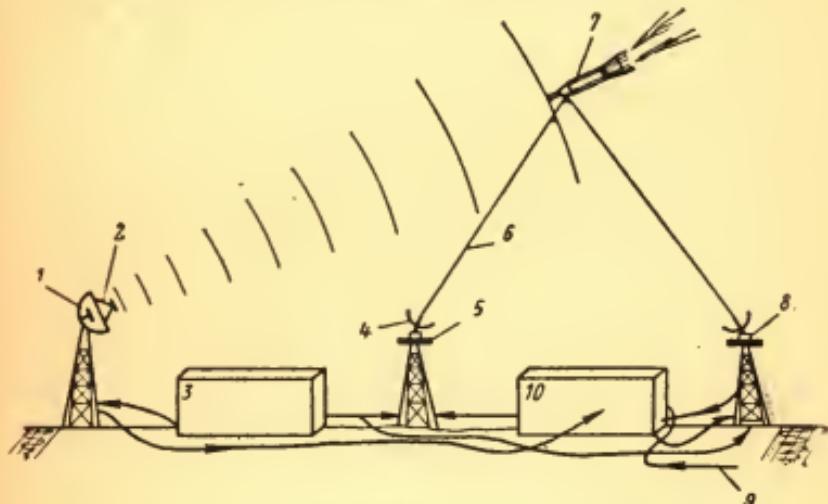


Рис. 5.8. Проект системы противоракетной обороны, основанной на использовании оптических квантовых генераторов:

1 — радиотокатор сопровождения, 2 — система опознавания «свой — чужой», 3 — источник питания мощностью выше 100 кВт, 4 — установка для уничтожения ракет с помощью ОКГ, 5 — платформа с аппаратурой автоматического наведения и фокусировки луча на цель, 6 — световой луч, 7 — ракета, 8 — точная оптическая система сопровождения цели, 9 — кабель связи от радиолокатора дальнего сопровождения, 10 — система управления.

Считают, что эти методы применения радиационного оружия имеют существенные недостатки, затрудняющие возможность их реализации. Основными недостатками бортового варианта является необходимость иметь сверхточные системы обнаружения и слежения за поражаемыми объектами, а также обеспечивать стабилизацию носителя лазерного оружия с угловой ошибкой, определяемой шириной раствора луча генератора.

Недостатки наземного варианта заключаются в сложности системы обеспечения наведения и удержания луча генератора на цели и в ослаблении атмосферой

даже при отсутствии облачности, что резко снижает дальность и уменьшает эффективность действия таких систем.

Несмотря на то, что возможность создания радиационного оружия ограничивается в настоящее время также рядом еще не решенных технических проблем и в качестве ближайшего срока появления опытных образцов таких систем указывается 1970 г. [29], исследования в этой области развернуты широким фронтом.

На основе нового образца оптического квантового генератора, способного создавать на поверхности облучаемого объекта температуру около 1 миллиона градусов при фокусировке луча в пятно диаметром 1 см, предполагается спроектировать бортовую систему радиационного оружия, обеспечивающего дальность действия от 64 до 320 км на высоте свыше 30 км над поверхностью Земли [31].

Генератор должен работать в импульсном режиме, создавая в импульсе мощность порядка нескольких гигаватт. В качестве активного вещества генератора используется водород, охлажденный до сверхнизкой температуры. Питание генератора обеспечивается атомным источником. Указывается, что такой генератор с источником питания может быть размещен на космическом корабле длиной 9—10 м и диаметром 3 м.

Разработки в области создания радиационного оружия ведутся многими фирмами США. Более 20 организаций, имеющих опыт работы в области оптических квантовых приборов, ведут исследования по созданию радиационного оружия [31]. Из них примерно 9 крупных фирм ведут непосредственные разработки схем и макетов систем лазерного оружия, на что в 1963 финансовом году военные организации США ассигновали более 3 млн. долл.

Несмотря на то, что уже к настоящему времени достигнут большой прогресс в повышении импульсной мощности оптических квантовых генераторов, доходящий в последних американских образцах до величины нескольких десятков и даже тысяч мегаватт [40], создание космического радиационного оружия требует решения ряда сложных технических проблем [31]. К ним, по мнению зарубежных специалистов, в первую очередь относятся:

- повышение мощности излучения в импульсе не менее чем на порядок по сравнению с существующими образцами мощных оптических генераторов;
- разработка сверхточных систем обнаружения, слежения и стабилизации положения космических аппаратов;
- разработка и осуществление фокусировки излучений на больших расстояниях;
- изучение процессов взаимодействия мощного излучения оптического квантового генератора с атмосферой и различными веществами.

Одним из путей решения первой задачи (наряду с увеличением размеров излучателя и повышением мощности систем накачки) считается [31] создание специальной системы в виде решетки из одинаковых оптических квантовых генераторов, собранных так, что их оптические оси параллельны, а излучение синфазно (причем источники возбуждения работают строго синхронно).

Параллельно с разработкой систем радиационного оружия, предназначенных для разрушения корпусов ракет и космических объектов путем непосредственного прожигания, ведутся исследования по созданию специальных видов этого оружия, служащего для вывода из строя чувствительных фотоэлектронных и радиотехнических элементов систем ориентации и управления спутников и космических кораблей. Так, по заданию Отдела космических систем ВВС США разрабатывается проект создания таких образцов радиационного оружия под шифром «Черный глаз» (Black Eye), предназначенного, в частности, для поражения чувствительных элементов бортовой инфракрасной аппаратуры [32].

Появление проектов нового радиационного оружия немедленно привело к развертыванию работ по исследованию методов и средств защиты от его воздействия. С этой целью рядом американских организаций ведутся исследования по изучению степени воздействия излучений оптических квантовых генераторов на материалы, из которых могут быть изготовлены корпуса поражаемых объектов. В качестве одного из возможных методов защиты указывается [29] на применение специальных оптических устройств, рассеивающих падающее излучение и ослабляющих местную концентрацию лучистого

потока. Ведутся исследования по ослаблению излучения оптических квантовых генераторов с помощью искусственных дымов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Aviation Week, 1961, July 24, p. 71—73.
2. Interavia Air Letter, 1961, № 4757.
3. 5-th Convention Military Electronics, 1961, VI, p. 279—284.
4. Electronic Design, 1963, v. 11, Aug. 16, № 17, p. 20.
5. Electronic News, 1962, v. 7, II, № 302, p. 8.
6. Electronic News, 1962, № 328, p. 14.
7. Product Engineering, 1964, 20/I, № 2, p. 49.
8. Missiles and Rockets, 1962, v. 11, July, № 6, p. 21.
9. Electronics, 1962, v. 35, № 29, p. 26.
10. Aviation Week, 1962, v. 75, № 3, p. 54—57, 60—62.
11. Aviation Week, 1961, v. 75, № 20, p. 99.
12. Aviation Week, 1961, v. 75, № 4, p. 71, 72, 75.
13. Missiles and Rockets, 1961, July, № 2, p. 16, 17, 21.
14. Proc. IRE, 1962, v. 50, № 7, p. 1703—1704.
15. Aviation Week, 1961, v. 75, № 15, p. 19.
16. Aviation Week, 1962, v. 76, № 21, p. 31.
17. Aviation Week, 1963, 23/IX, p. 95—96.
18. Phys. Rev. Letters, 1962, v. 8, № 7, p. 269—272.
19. Electronics, 1963, v. 36, № 7, p. 7.
20. Electronics, 1962, v. 35, № 36, p. 20.
21. Aviation Week, 1962, v. 76, № 18, p. 17.
22. Interavia Air Letter, 1962, № 5029, p. 5.
23. Electronic News, 1962, № 325, p. 12.
24. Electronics, 1962, v. 35, № 27, p. 7.
25. Radio and Television Weekly, 1963, 4/III, № 9, p. 16.
26. IRE Trans. 1962, June, v. ANE-9, № 2, p. 104—109.
27. Шавлов А., Фогель С., Дальберджер Л. Оптические квантовые генераторы. Пер. с англ. Изд-во иностранной литературы, 1962.
28. Semiconductive Production, 1962, v. 5, № 16, p. 17.
29. Aviation Week, 1963, 17/VI, № 24, p. 23.
30. Electronics, 1963, 3/V, № 18, p. 20—21.
31. Electronics, 1961, v. 34, № 51, p. 17.
32. Electronics, 1961, v. 34, № 41, p. 4.
33. Aviation Week, 1962, v. 76, № 11, p. 229, 231, 232, 237, 239, 241.
34. Aviation Week, 1962, v. 76, № 13, p. 41—43.
35. Aviation Week, 1962, v. 76, № 21, p. 23.
36. Aviation Week, 1962, 30/VII, № 5, p. 59.
37. Electronics, 1963, Apr. 26, v. 36, № 17, p. 76.
38. Aviation Week, 1963, v. 78, № 16, p. 54—64.
39. Aviation Week, 1963, v. 79, № 13, p. 6.
40. Electronic News, 1963, v. 8, № 389, p. 72.
41. Electronics, 1963, v. 36, № 42, p. 24.
42. Electronic News, 1963, v. 8, № 392, p. 1, 11.
43. Missiles and Rockets, 1963, v. 13, № 9, p. 9.
44. Missiles and Rockets, 1963, v. 13, № 11, p. 23.
45. Electronics, 1963, v. 36, № 40, p. 44—46.
46. Electronic News, 1963, v. 8, № 400, p. 1, 27.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Введение</i> . . . . .	3
<i>Глава первая. Основные физические принципы работы оптических квантовых приборов</i> . . . . .	11
1. Основные понятия о характеристиках излучения . . . . .	11
2. Элементарные понятия о квантовых системах . . . . .	18
3. Принцип действия оптических квантовых генераторов и усилителей и особенности их излучения . . . . .	24
4. Соотношения между некоторыми единицами измерения, используемыми в технике оптических квантовых приборов . . . . .	30
<i>Литература</i> . . . . .	32
<i>Глава вторая. Элементы, устройство и характеристики оптических квантовых приборов</i> . . . . .	33
1. Основные элементы оптических квантовых приборов . . . . .	33
2. Активные вещества, применяемые для оптических квантовых приборов . . . . .	33
3. Объемные резонаторы . . . . .	48
4. Методы возбуждения (накачки) . . . . .	51
5. Источники питания . . . . .	57
6. Оптические системы квантовых приборов . . . . .	58
7. Устройство оптических квантовых генераторов . . . . .	59
<i>Литература</i> . . . . .	81
<i>Глава третья. Модуляция, прием и управление излучением оптических квантовых генераторов</i> . . . . .	84
1. Модуляция излучения . . . . .	84
2. Прием и детектирование . . . . .	91
3. Управление излучением . . . . .	96
<i>Литература</i> . . . . .	99
<i>Глава четвертая. Применение оптических квантовых приборов в Армии и Военно-морском флоте</i> . . . . .	101
1. Некоторые особенности прохождения оптических излучений в атмосфере . . . . .	101
	173

2. Некоторые трудности, связанные с применением оптических квантовых приборов . . . . .	107
3. Основные направления применения оптических квантовых приборов в Армии и Военно-морском флоте . . . . .	110
4. Экспериментальные оптические квантовые дальномеры . . . . .	111
5. Установки для наземной оптической связи с использованием квантовых генераторов . . . . .	123
6. Применение оптических квантовых приборов в системах подводного обнаружения и связи . . . . .	129
7. Использование квантовых приборов в вычислительной технике . . . . .	133
8. Наземная полуактивная система наведения на оптических квантовых приборах . . . . .	135
9. Указатель угловой скорости вращения на основе газового оптического квантового генератора . . . . .	136
10. Использование оптических квантовых генераторов в качестве радиационного оружия . . . . .	139
<b>Литература . . . . .</b>	<b>141</b>
 <i>Глава пятая. Основные направления применения оптических квантовых приборов в ракетной и космической технике . . . . .</i>	
1. Возможные области применения квантовых приборов в ракетной и космической технике . . . . .	144
2. Оптические квантовые генераторы в бортовой аппаратуре космических кораблей . . . . .	145
3. Возможности применения оптических квантовых генераторов в системах наведения и автономного управления ракет . . . . .	155
4. Системы с оптическими квантовыми генераторами для слежения за ракетами и космическими кораблями . . . . .	156
5. Оптические квантовые приборы в космических системах связи и передачи информации . . . . .	159
6. Возможности использования оптических квантовых генераторов для создания космического и противоракетного радиационного оружия . . . . .	165
<b>Литература . . . . .</b>	<b>172</b>

АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ИЗНАР, БОРИС ФЕДОРОВИЧ ФЕДОРОВ  
Оптические квантовые приборы (лазеры) и их применение  
в военной технике

Редактор *И. М. Волкова*. Техн. редактор *В. В. Беляева*  
Обложка художника *П. И. Степана*

---

Сдано в набор 25/XII—1963 г. Подписано к печати 11/V—1964 г.  
Формат 84 × 108<sup>1/2</sup> Уч.-изд. л. 9,38 Объем 9,02 л. л.  
Г-14606 Тираж 14 900 экз. Заказ 668 Цена 47 коп.  
Бланк заказов № 7, 1964 г.

---

Московская типография № 10 Главполиграфпрома  
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати  
Шлюзовая наб., 10.

